



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# ESTUDIO MORFODINAMICO DE PUNTOS SINGULARES DEL RIO AMAZONAS

Treball realitzat per:

**Francisco González Cabrera**

Dirigit per:

**Allen Bateman Pinzón**

Grau en:

**Enginyeria d'Obres Públiques**

Barcelona, 26 de Setembre del 2019

Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental

**TREBALL FINAL DE GRAU**

## Agradecimientos

A Allen Bateman, por su paciencia, sus conocimientos y su increíble don para la enseñanza.

A mis padres, por su incondicional apoyo en todas las etapas de mi vida.

A mi pareja, Erola Borrell, por su ayuda y por todo lo que me aporta día a día.

A mis suegros, por su cariño y sus consejos.

A mis amigos, por ser miembros más de mi familia, y en especial a Pau Maresma por estar ahí siempre. También a René Araneda, físico teórico chileno, que apareció en casa y discutimos de física durante noches.

Y, finalmente, para todas aquellas personas que de una manera u otra han colaborado en hacer quien soy yo hoy.

## Contenido

Agradecimientos .....	2
Resumen.....	4
1. Introducción .....	5
2. Objetivos .....	6
3. Metodología .....	7
3.1. Introducción .....	7
3.2. Resumen del proceso .....	7
3.3. Metodología paso a paso .....	10
4. Análisis Descriptivo .....	17
4.1. Introducción .....	17
4.2. Descripción de morfologías.....	18
4.2.1. Punto singular 1.....	18
4.2.2. Punto singular 2.....	22
4.2.3. Punto singular 3.....	26
4.2.4. Punto singular 4.....	30
4.2.5. Punto singular 5.....	34
4.2.6. Punto singular 6.....	41
4.2.7. Punto singular 7.....	45
4.2.8. Punto singular 8.....	50
5. Análisis Físico.....	52
5.1. Cantidad de movimiento y flujo de cantidad de movimiento.....	52
5.2. Hipótesis.....	54
5.3. Desarrollo de la formulación.....	55
5.4. Verificación de la hipótesis.....	56
6. Resultados .....	57
6.1. Modelización base.....	57
6.2. Modelización Punto Singular 1.....	60
6.3. Modelización Punto Singular 5.....	64
6.4. Modelización Punto Singular 7.....	67
7. Conclusiones.....	69
8. Estudios Futuros.....	70

## Resumen

El “Estudio morfológico de puntos singulares del Amazonas” surge de la necesidad de resolver las deposiciones sedimentarias en el canal Colombia del río Amazonas cercano a la localidad de Leticia (Colombia).

Inicialmente, ya se intuía que la sedimentación era provocada por la unión del brazo de oreja pero no estaba analizada su evolución ni una respuesta clara. Y así se inició el estudio.

El presente trabajo está estructurado en forma de estudio. Está formado por la introducción, objetivos, metodología, análisis descriptivo y físico, resultados y conclusiones. Además para obtener información para dicho estudio ha sido necesario realizar un análisis de una gran cantidad de imágenes satelitales Landsat desde el inicio de su captación hasta la actualidad. Y para corroborar los datos, observados y medidos, ha sido necesario realizar diversas modelizaciones para obtener resultados de comprobación.

Finalmente se confirma la hipótesis propuesta mediante la aplicación del concepto de flujo de cantidad de movimiento y el análisis de una sección curva mediante el equilibrio de fuerzas en un diagrama de cuerpo libre.

## 1. Introducción

El presente trabajo de final de grado corresponde a un estudio enmarcado dentro del transporte de sedimentos. El apoyo necesario para la investigación realizada se hace a través del Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña.

La elección del tema de estudio “Estudio morfodinámico de puntos singulares en el río Amazonas” es consecuencia de la propuesta por parte del Profesor Allen Bateman, de la misma universidad, de varios temas relacionados con el transporte de sedimentos.

La motivación para el estudio surge de la observación de los movimientos de orilla y la formación de diversas configuraciones de sedimentos que evolucionan en el transcurso del tiempo. Además supone un reto investigar sobre un tema aún por desarrollar a día de hoy y este trabajo de final de grado pretende dar inicio a su estudio.

El presente trabajo comporta el estudio y el planteamiento conceptual de formaciones morfológicas peculiares del curso del río Amazonas mediante el tratamiento de imágenes satelitales, captadas a través de métodos de teledetección. Es necesario el establecimiento de un método de análisis y clasificación de las formaciones sedimentarias variables a lo largo del cauce del río. Así pues, los movimientos de orilla se visualizan a partir del análisis de las imágenes para observar y cuantificar las velocidades de cambio. Se entiende como la finalidad de este estudio el dar respuesta a cómo y cuándo aparecen y desaparecen las morfologías observadas.

## 2. Objetivos

El presente trabajo de final de grado tiene como objetivo estudiar y plantear de manera conceptual formaciones morfológicas peculiares del curso del río mediante el tratamiento de imágenes satelitales.

El estudio de la evolución de las morfologías del cauce, centrada en los puntos singulares del mismo, se realiza mediante el soporte de imágenes satelitales, captadas a través de métodos de teledetección. Estas imágenes se deben descargar, organizar y tratar para el desarrollo de la hipótesis.

La hipótesis se formulará a posteriori del tratamiento de datos y su exhaustiva descripción. La descripción comprenderá la visualización y medición de los movimientos de las orillas para establecer las velocidades de cambio.

Así pues el estudio pretende entender cómo y cuándo aparecen y desaparecen los puntos singulares formados por las morfologías de interés. Estas morfologías de estudio hacen referencia a aquellas que nombramos como Orejas detectadas a lo largo del río Amazonas.

También se añade que este trabajo pretende aportar más información para posteriores estudios de corrientes secundarias y transporte de sedimentos.

### **3. Metodología**

#### **3.1. Introducción**

El presente trabajo consta de un estudio de investigación centrado en la observación y análisis de las morfologías Amazónicas para dar respuesta a la formación de puntos singulares en el transcurso del río Amazonas.

Para el análisis de las imágenes se ha estipulado un método de trabajo para poder realizar la tarea previa a la conclusiva. Las imágenes satelitales utilizadas pertenecen a diversos satélites Landsat de los cuales solo algunos proporcionaban las cualidades óptimas para el estudio. Durante el proceso se han utilizado diversos programas informáticos para captar, convertir y tratar las imágenes del estudio. Una vez realizadas estas tareas se procedió al estudio de los puntos singulares.

Finalmente, una vez determinadas las formaciones de estudio, se han realizado diversas modelizaciones de puntos singulares destacados para confirmar la hipótesis con los resultados obtenidos.

#### **3.2. Resumen del proceso**

La metodología de trabajo se basa principalmente en el tratamiento de las imágenes satelitales seleccionadas para su posterior estudio y discusión. Mediante el uso de los programas informáticos y portales web se ha podido realizar la tarea pese a su complejidad por el volumen de datos a tratar. Para esto, se ha debido acotar el río Amazonas en diferentes tramos para obtener una división cómoda para la agrupación y tratamiento de los datos.

El río Amazonas es el río más grande del mundo con una longitud aproximada de unos 6800km. En el transcurso del río se localiza una cantidad contable de formaciones morfológicas de diferente tipología. Es necesario catalogar estas tipologías para acotar los puntos singulares de interés.

De formaciones morfológicas a lo largo del cauce se pueden contabilizar una cantidad aproximada de 100 puntos de estudio. Estos puntos se caracterizan por la formación de islas o subdivisiones del cauce en varios brazos. Sin embargo es necesario acotar, aún más, el tipo de

formaciones que se requieren para el estudio. Pues las que interesan son aquellas que forman una subdivisión del cauce en forma de oreja. Esta tarea tiene su complejidad debido a la mutabilidad del cauce y las zonas de mayor aglomeración de elementos como pueden ser; la desembocadura de un cauce secundario en el río, lagos adyacentes comunicantes o construcciones hechas por la mano del ser humano. Se observa, a partir de la ciudad brasileña de Manaus, un entramado de cauces secundarios y lagos los cuales son motivo para desestimar el estudio aguas abajo desde este punto.

La división del cauce se realiza siguiendo el patrón de escenas de imágenes satelitales Landsat disponibles en GloVis. Landsat ofrece un tamaño de imagen de 185x185 km así que el río, entre Iquitos y Manaus, queda recogido en 18 imágenes satelitales. De estos tramos se desestiman aquellos que pertenecen a una superposición de imágenes por la poca calidad y variabilidad en la disposición geográfica de estas. Los tramos de posible estudio se reducen considerablemente de 18 tramos a 10 tramos en los cuales, en algunos también encontramos solapamiento por no ser exacta la captación. De todas formas se realiza la descarga de todas las imágenes satelitales que contienen una porción del río y se organizan de la forma expuesta a continuación pero sin tratar las imágenes.

### **GloVis**

Una vez realizada la elección de los tramos se procede a la descarga de imágenes satelitales Landsat desde el portal GloVis. Las primeras captaciones de imágenes se producen durante el año 1974 que corresponde a dos años después del lanzamiento de la primera serie de satélites, nombrada, Landsat 1. En el portal encontramos una amplia selección de imágenes organizadas de la siguiente manera: Landsat 1-5, Landsat 4-5, Landsat 7 y Landsat 8. El periodo de imágenes registradas engloba desde 1974 hasta 2019. Las primeras imágenes son de poca calidad y va aumentando su nitidez con los lanzamientos de las nuevas series de satélites Landsat. En la zona de estudio se aprecia un error en las captaciones de Landsat 7 debido a la distorsión producida por múltiples zonas ralladas en las imágenes así que se desestiman. La desestimación también abarca las imágenes captadas por las primeras series de satélites Landsat hasta Landsat 4 por la imposibilidad de tratar las imágenes en las bandas RGB, aunque sí que se procede a su descarga para un análisis visual.



## **QGIS**

Las imágenes se descargan en base a la organización realizada por tramos y se organizan por años, desde 1974 hasta la actualidad, en un proyecto dentro del programa informático QGIS, sistema de información geográfica de uso libre. El proyecto vertebra las imágenes, dentro del mismo año, en una secuencia formada por tres archivos. Cada imagen satelital descargada, directamente de GloVis, contiene varios archivos de los cuales solo utilizamos la imagen .TIF. Esta imagen en formato .TIF se convierte en un archivo ráster (.tif) mediante el uso de la calculadora ráster donde se selecciona la banda roja y se restringe la visualización para solo distinguir el cauce del río. Después esta imagen se poligonaliza obteniendo un último archivo shape (.shp). Por consiguiente, éste último archivo resultante, es con el que se trabaja para realizar las comparativas entre años. Estas comparativas se analizan mediante el uso de herramientas propias del programa QGIS que nos permiten medir, con las imágenes superpuestas, y así evaluar la evolución de las morfologías. De manera visual podemos observar los cambios entre años pero es midiendo como se confirman las observaciones ya que hablamos de mediciones de decenas, centenas y millares de metros.

## **IBER**

Como proceso separado, al tratamiento de imágenes, se realiza el diseño de formaciones basando en las mediciones tomadas para su posterior modelización. La modelización del cauce se realiza mediante el programa IBER. El programa IBER es un modelo numérico para la simulación de flujos inestables con una superficie libre turbulenta y procesos ambientales en sistemas hidráulicos creado por el Instituto Flumen.

En el programa se han introducido archivos (.dwg) que se han diseñado mediante el programa AutoCAD. Los diseños corresponden a un modelo ideal de oreja y otros tres basados en las formaciones más interesantes desde el punto de vista tensional.

Siguiendo un sencillo proceso de; asignación de superficie, introducción de datos como caudal, cota referente al calado y  $n$  de Manning se han podido calcular múltiples datos de la formación.

De los datos calculados interesan las tensiones de fondo, principal elemento de estudio, las velocidades, la variación de las cotas y en un caso puntual, por ser más específico, el cálculo del caudal específico.

### 3.3. Metodología paso a paso

El proceso de investigación se inicia con el registro de una cuenta en la web seleccionada para la descarga de las imágenes satelitales <https://glovis.usgs.gov>. Esta opción solo es necesaria si no se dispone de una cuenta en la web. El proceso de registro consiste en introducir un nombre de usuario y asignar una contraseña para acceder al portal. Una vez registrado solo será necesario entrar al portal y se accede a la biblioteca de imágenes.

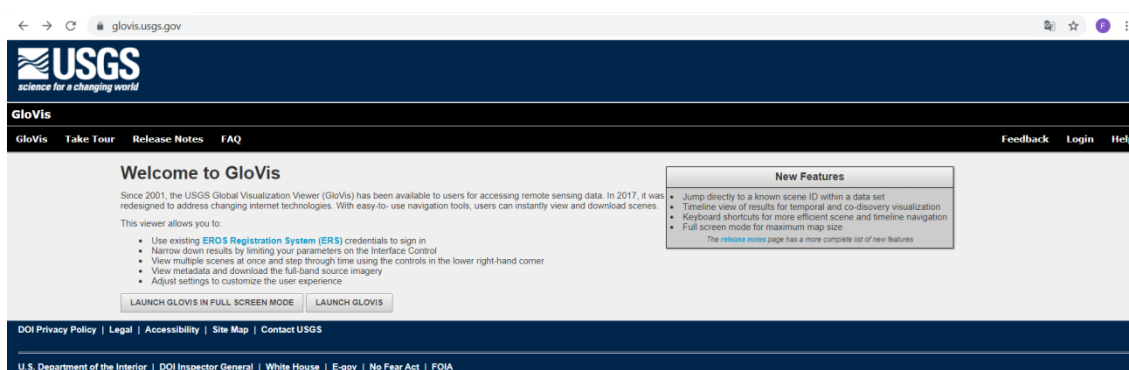


Ilustración 1: Portal GloVis

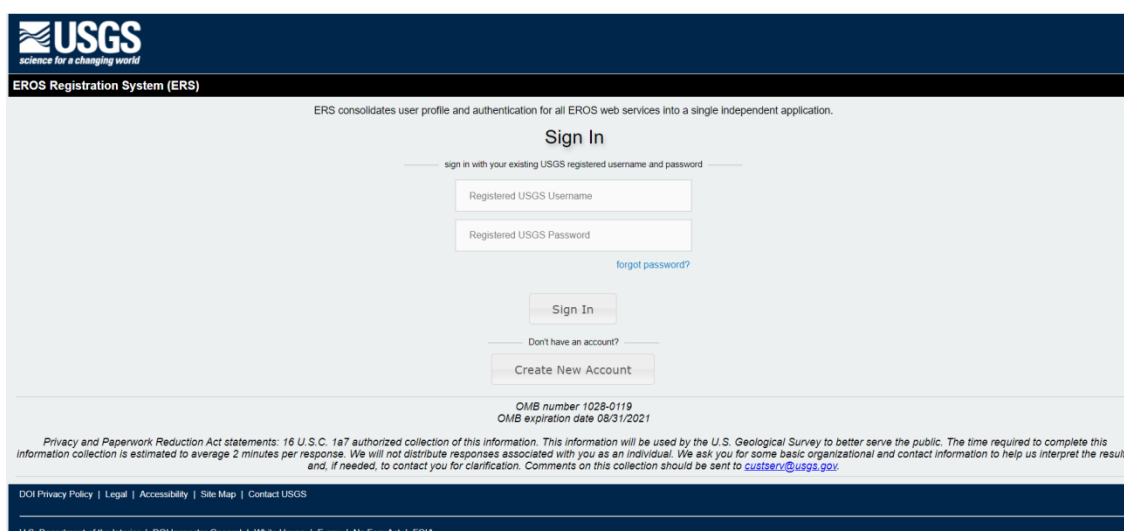


Ilustración 2: Pantalla de registro del portal GloVis

La biblioteca del portal ofrece una amplia gama de imágenes de diferentes proyectos satelitales. Se elige Landsat por ofrecer un mayor periodo de captación de imágenes comprendidas entre 1974 y 2019. Además, en GloVis, mediante el filtro de metadatos se puede acotar entre qué años, qué opacidad provocada por las nubes y qué meses del año se requieren las imágenes. El presente estudio selecciona el mayor periodo posible temporal, una opacidad máxima del 30% y todos los meses del año.

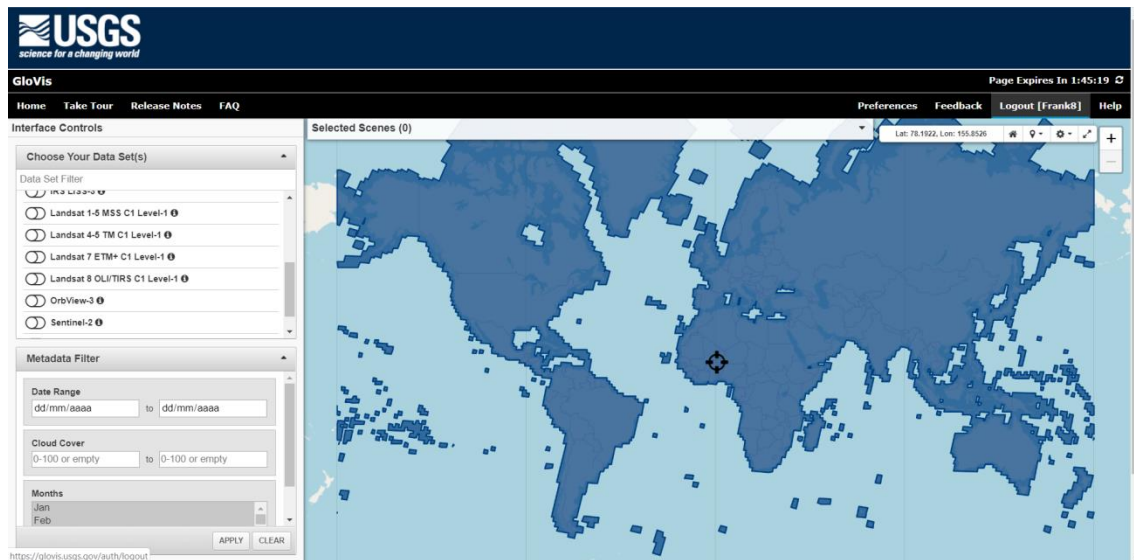


Ilustración 3: Cobertura de GloVis en el mapa mundi

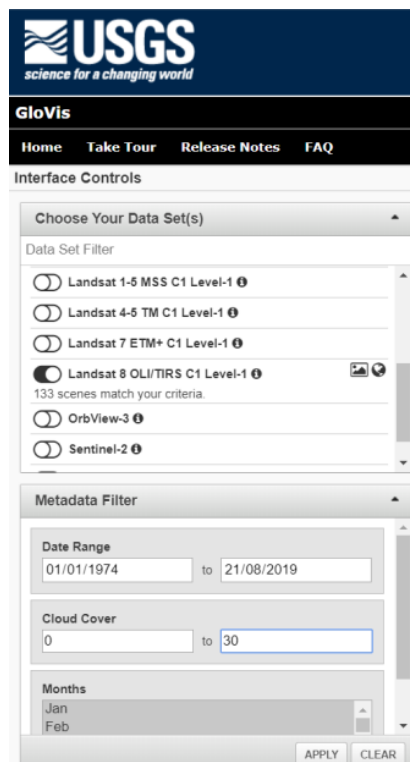
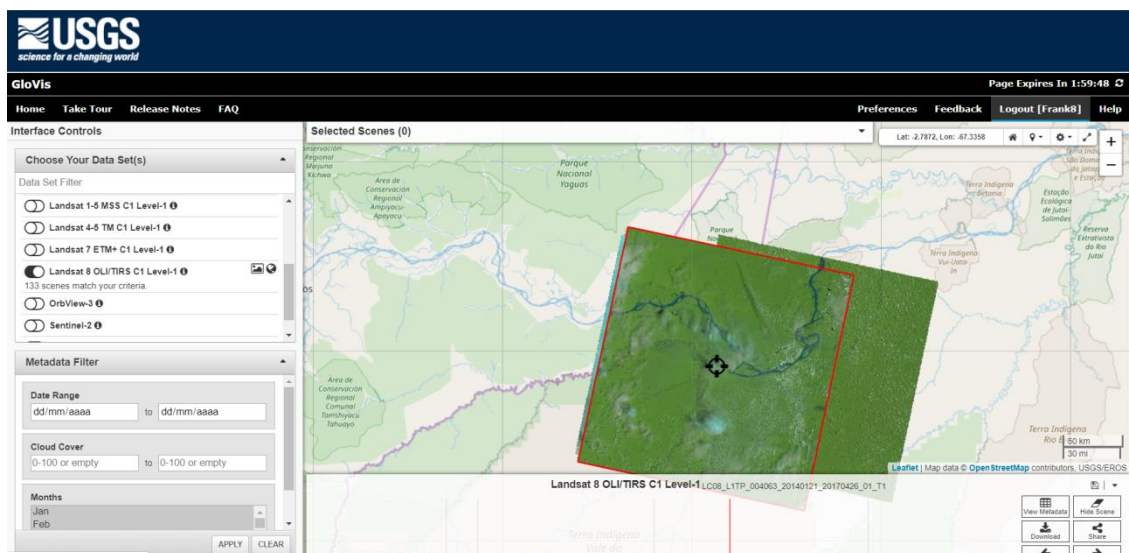


Ilustración 4: Detalle de Interface de control

Para la descarga de un tramo del río se debe colocar el cursor del portal en el centro del cauce. El propio portal selecciona las imágenes correspondientes al lugar elegido y entonces ya se puede iniciar la descarga de las imágenes una por una. Este proceso es lento debido a la cantidad de imágenes de las que se dispone. El número de imágenes por tramo es variable dependiendo de las disponibles en el portal pero pueden llegar al millar o superarlo.



**Ilustración 5: Localización de casilla de descarga con el puntero**

Finalizada la descarga, y debidamente guardadas y organizadas en diferentes carpetas, se prosigue a la creación de tantos proyectos QGIS como en tramos se ha dividido el río.

Se abre el programa QGIS 2.18.28 Las Palmas, versión utilizada para este estudio. Se selecciona la opción de **Nuevo** en la esquina superior izquierda del directorio. Aparece un nuevo proyecto el cual hay que **Guardar como**, seleccionando el icono del disquete, con el nombre del tramo deseado y guardarlo en una carpeta exclusiva para el proyecto en la unidad principal de Windows (**C:**). Al guardar el proyecto en esta ubicación es posible abrirlo en cualquier ordenador con sistema operativo Windows puesto que, de esta manera, se respeta la ruta de acceso de QGIS a los archivos utilizados y creados.

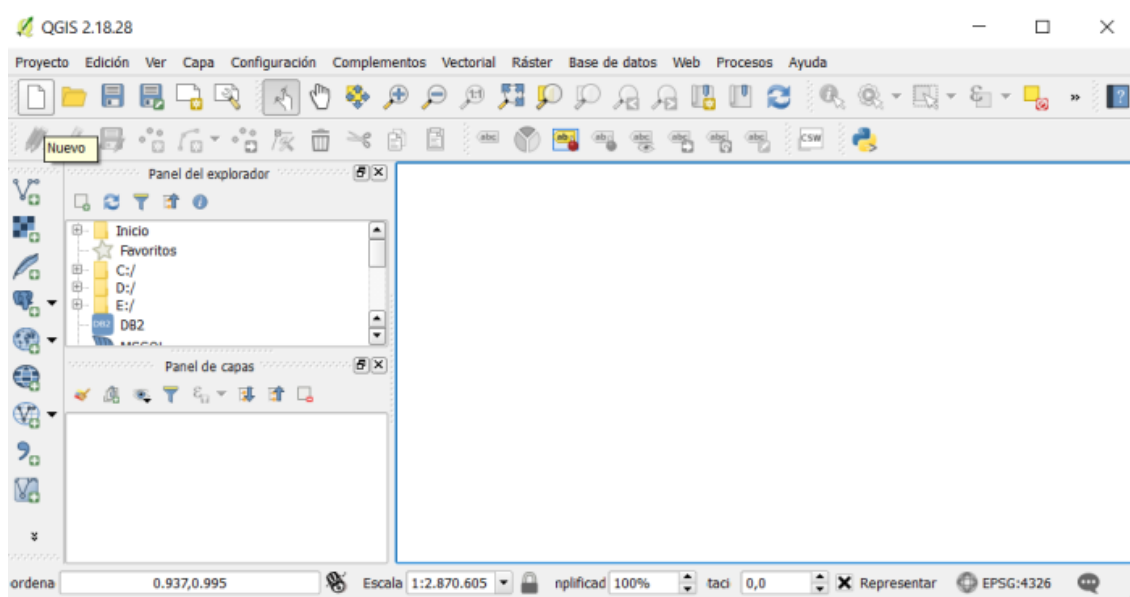


Ilustración 6: Interfaz de usuario del programa QGIS 2.18.28

Una vez creado el proyecto del tramo se crean tantos grupos como de años de estudio disponemos. El número total de grupos es de 35 que corresponde a los años que hay entre 1974 y 2019. Para crear los grupos se utiliza la ventana de **Panel de capas** → **Añadir grupo**. Es importante organizar los años de manera inversa a la sucesión cronológica, es decir, se inicia en el año 2019 y se finaliza en el año 1974.

El siguiente paso consiste en añadir todas las imágenes (.tif) descargadas de GloVis y ordenadas por años también en sentido inverso al cronológico. Se inicia en Diciembre y se acaba en Enero. Esta organización se debe a que con un movimiento de la pantalla de QGIS se van superponiendo las imágenes para ver la evolución. Así si las colocamos en orden inverso inicia la superposición desde la imagen inferior del directorio (1974) hasta la actualidad (2019). Para añadir las imágenes se clicla la casilla **Añadir capa ráster** y se busca la imagen en **Windows (C:) → TFG → Tramos → Tramo X → Imagen**.

Una vez se han introducido todas las imágenes, organizadas por fecha en orden decreciente, se precisa definir el cauce del río mediante el uso de las bandas RGB. Para este proceso se debe utilizar la Calculadora ráster. Esta herramienta del QGIS nos permitirá elegir una banda de color, en este caso la Banda 1 que corresponde al rojo. La elección de la banda se realiza de manera visual y es en ésta donde mejor se aprecia la diferencia entre píxeles.

Mediante el uso de la herramienta **Identificar objetos espaciales** se analizan píxeles aleatorios a lo largo del curso del río, se anota el valor más bajo y el valor más alto de la banda a utilizar.

Así es posible acotar entre qué valores se define el cauce del río en la Banda Roja. Los valores usuales utilizados van de 10 a 70 dependiendo de la imagen. Es necesario analizar cada imagen individualmente y ajustar el rango de valores a utilizar en la calculadora.

Así, introducido el proceso, se continua con la creación del ráster bicolor en el cual el río tendrá valor 1, representado en color blanco, y el resto en negro correspondiente al valor 0. Cabe destacar que solo en días completamente claros se obtiene un ráster sin distorsiones, producidas generalmente por la sombra de las nubes.

Los pasos a seguir son:

**Ráster → Calculadora ráster** y se obtiene la pantalla presentada a continuación.

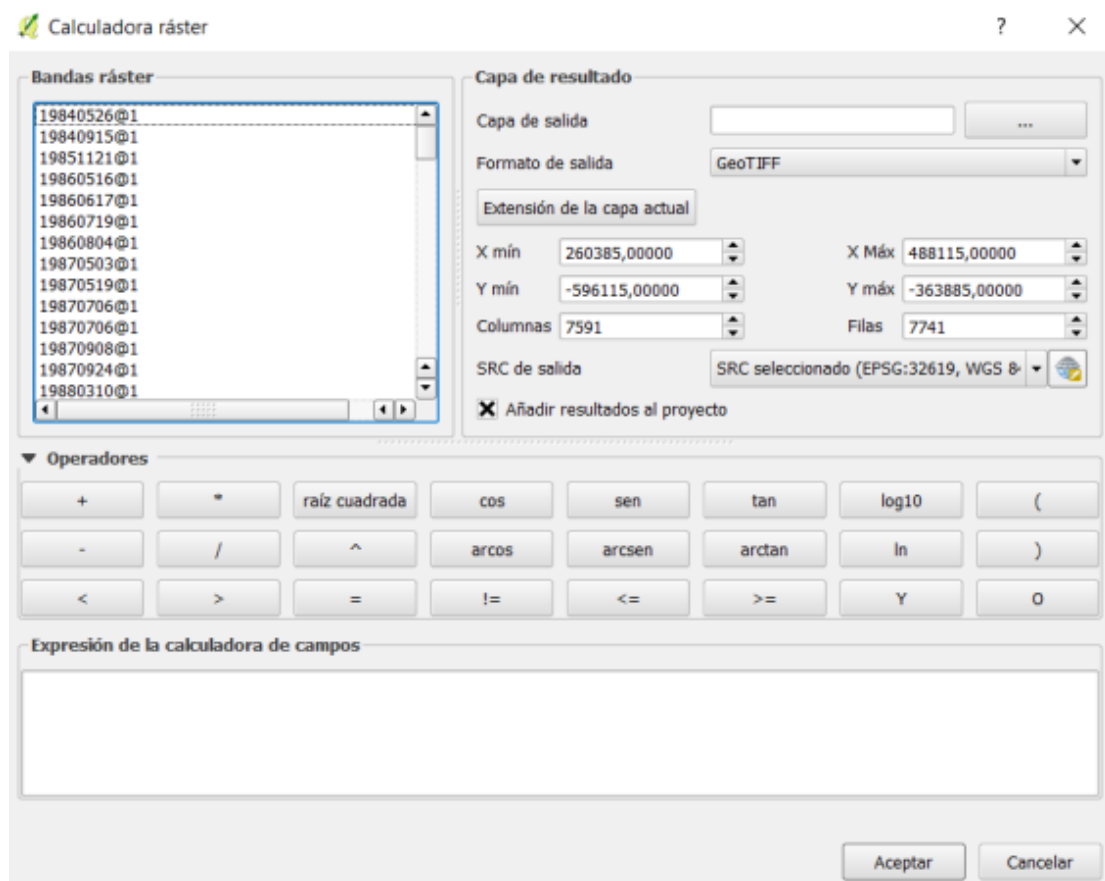


Ilustración 7: Herramienta QGIS Calculadora ráster

En la pantalla se aprecian varias ventanas. En el margen izquierdo encontramos la selección de **Bandas Ráster**. En la parte inferior se ubica la ventana **Expresión de la calculadora de campos** donde se introduce la expresión a calcular. Es importante utilizar los operadores ofrecidos en la pantalla ya que, introducirlos directamente desde el teclado, puede dar error.

La expresión debe estar comprendida entre paréntesis y el formato de la expresión es idéntico al siguiente ejemplo:

```
("LC08_L1GT_004063_20150601_20170408_01_T2@1" >= 10 AND  
"LC08_L1GT_004063_20150601_20170408_01_T2@1" <= 70 )
```

En la esquina superior derecha se ubica **Capa de resultado**. Es aquí donde se guardará el resultado de la imagen procesada. Los archivos obtenidos se han guardado en una carpeta llamada RedX, también en la unidad Windows (C:), dentro de la carpeta del tramo correspondiente y se han nombrado (año mes día) (Ej. 190412, Correspondiente al día 12 de Abril de 2019). Y finalmente se han añadido los archivos resultantes al proyecto del tramo, en el año al que pertenecen.

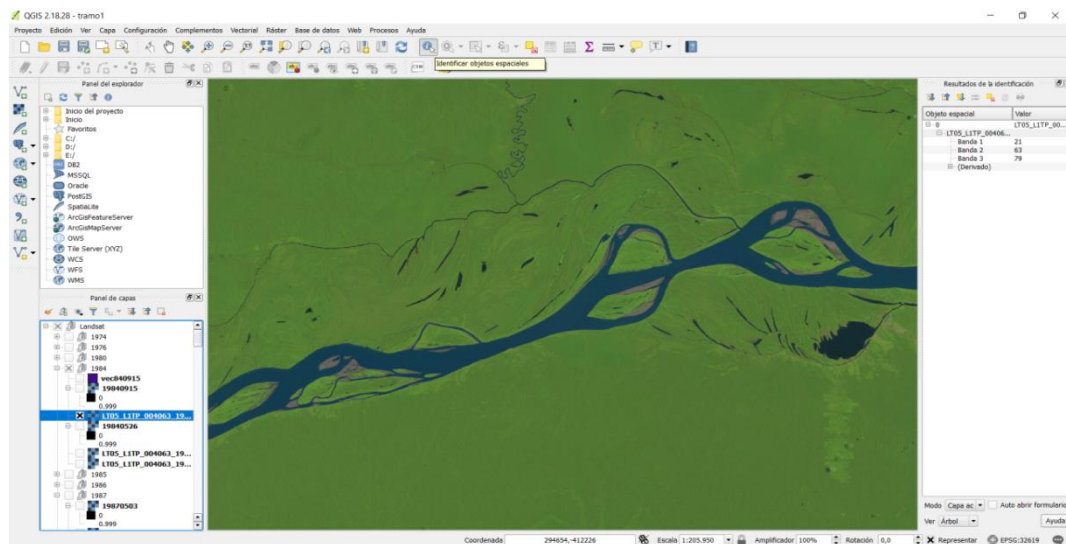


Ilustración 8: Imagen descargada sin tratar

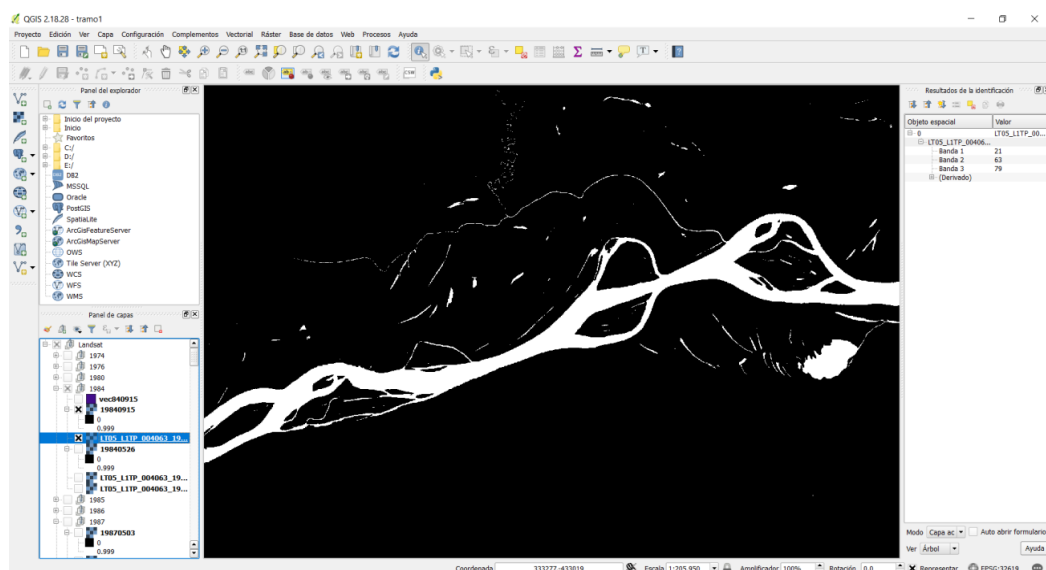


Ilustración 9: Imagen resultado con Calculadora ráster

Por último, con los ráster obtenidos, realizamos una poligonización. De esta manera pasamos el archivo ráster a un archivo vectorial en formato (.dbf). Para realizar este proceso se sigue el siguiente procedimiento **Ráster → Conversión → Poligonizar (ráster a vectorial)**...

La siguiente captura de pantalla muestra la pantalla emergente de este proceso. Es necesario introducir el archivo de entrada (ráster) correspondiente al proceso anterior, es decir, el ráster en blanco y negro. Se vuelve a nombrar el archivo de salida con el mismo nombre que el introducido. Antes de aceptar, es importante, asignar el uso de máscara para la visualización del archivo resultante.

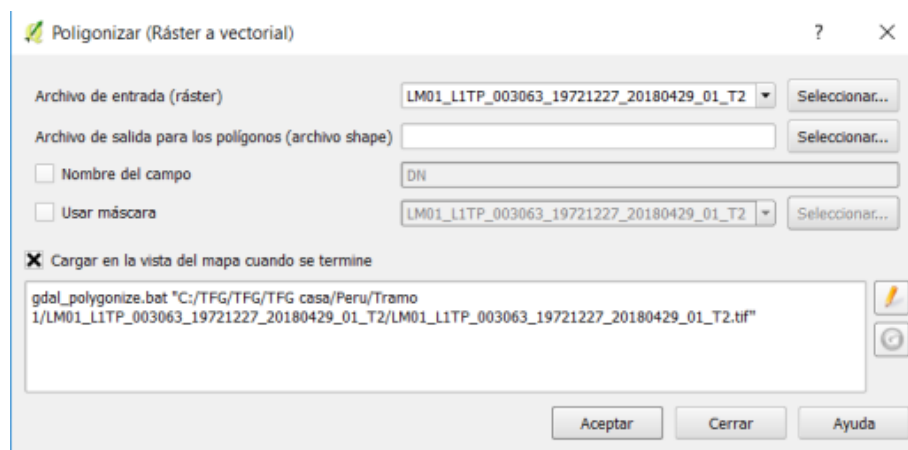


Ilustración 10: Ventana de la herramienta de conversión Poligonizar

Con este proceso queda concluido el tratamiento de las imágenes para su posterior estudio.

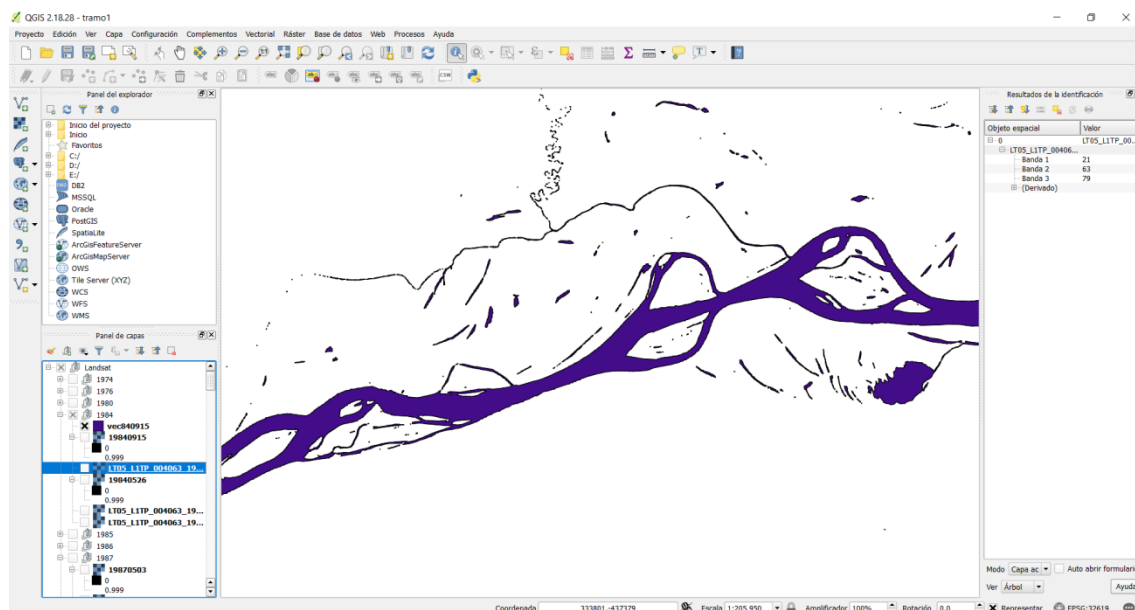


Ilustración 11: Imagen resultado después de la poligonización



## 4. Análisis Descriptivo

### 4.1. Introducción

Para marcar un inicio del análisis detallado de las diversas formaciones a lo largo del río Amazonas se elige el tramo del cauce que discurre y hace de frontera entre Brasil, Colombia y Perú. El tramo en cuestión corresponde a la casilla 4063 de la cuadrícula de captación de imágenes satelitales de Landsat.



Ilustración 12: Captura de pantalla de Google Earth del tramo de estudio con las morfologías marcadas

De la imagen anterior se eligen 8 morfologías. Se analizarán, individualmente, presentando una descripción de su evolución en un periodo de 45 años. Este periodo corresponde al registro de imágenes satelitales que se inició en 1974 hasta el 2019. Cabe destacar que las circunstancias meteorológicas no siempre son propicias para la toma de imágenes y, por tanto, existen saltos temporales en el análisis. Estos saltos temporales son necesarios para el análisis de las dimensiones de las sedimentaciones ya que este proceso se da durante un periodo de años.

Dentro de esta selección de morfologías de estudio existen importantes diferencias entre ellas. Claramente hay algunas que sí presentan la morfología en su estado más puro de Oreja, que es la que interesa en este estudio, y en cambio hay otras que pueden ser formaciones anteriores o posteriores. Incluso encontramos en algunos casos indicios del posible nacimiento de formaciones en oreja.

## 4.2. Descripción de morfologías

### 4.2.1. Punto singular 1

<b>Morfología</b>	1
<b>Coordenadas (Lat., Long.)</b>	-3.7864 , -69.3908
<b>Tipo de formación</b>	Oreja
<b>Casilla Landsat</b>	4063

#### Descripción:

El flujo de agua se da de sur a norte. La presente morfología abarcará una zona de estudio comprendida en una longitud de cauce aproximada de 8km y 6km de ancho.



Ilustración 14: Landsat 19840915



Ilustración 13: Landsat 20170809

Como primera morfología descrita, es un gran ejemplo de estudio la observación de la evolución producida, así como el engrandecimiento de la isla oreja y la aparición de otras formaciones sedimentarias dentro del cauce.

En 1984, véase ilustración 15, presenta un brazo principal de aproximadamente unos 2.000 metros con cierta variación en su ancho. De la orilla izquierda con sentido de flujo aguas abajo se presenta una bifurcación del flujo a través de un brazo, brazo de oreja, de aproximadamente 6



Ilustración 15: Imagen 19840915

km desde su eje central que vuelve a unirse al canal principal a unos 5 km desde su nacimiento. En un inicio se registra un ancho de entrada de unos 700 metros, un ancho central de 500 metros y un ancho de salida algo inferior a 500 metros.

En los años sucesivos, entre 1984 y 1990, observando la superposición de imágenes, véase Ilustración 16, se producen sedimentaciones en la unión del brazo de la oreja el brazo principal con el principal. La sedimentación se produce justo por encima de la unión formando una isla de 1.3 km de longitud y 300 m de ancho en la zona más extensa. La isla presenta una forma almendrada. Estas sedimentaciones son objeto de estudio por ser un indicio de las fuertes tensiones de fondo producidas en la unión con el brazo principal.



Ilustración 16: Imagen 19900628-19840915



Ilustración 17: Imagen 19920828-19900628

En pocos años se produce la unión de la nueva isla formada a la salida del brazo de oreja con la propia isla que forma la oreja. Es decir estas sedimentaciones en el brazo principal se acaban uniendo a la isla de la oreja. Dependiendo del calado del río, y por tanto de la época del año, se observa la unión y separación de este conjunto de islas. En general se observa que a partir del mes de Agosto se produce la visualización de las sedimentaciones. Estas sedimentaciones pueden abarcar grandes extensiones de terreno pero pueden ser efímeras. En la superposición, véase ilustración 17, observamos este fenómeno.



Ilustración 18: Imagen 19980821-19920828

La isla grande, resultado de la unión de las sedimentaciones a la salida del brazo con la ya existente, presenta una estabilidad en sus dimensiones durante un intervalo de entre 5 a 8 años, véase ilustración 18. La isla resultante presenta unas dimensiones aproximadas de 6.5 km de longitud y 2.7 km de ancho que presenta una cierta variabilidad. Este fenómeno produce que el brazo de oreja aumente de longitud debido a

las formaciones sedimentarias producidas en el brazo principal y también por la acumulación de sedimento en la orilla izquierda a su salida hacia el canal principal.

Como resultado, de esta formación mayor, se produce un desvío del brazo principal formando una curva que rodea la isla y una disminución del ancho del brazo secundario. Además también cambia el ángulo de salida del brazo. Se intuye que éste es un hecho remarcable para la morfología y su evolución.

La plena consolidación de la isla se da por los alrededores de 1998, véase ilustración 19, aunque a partir de 1995 ya apareció vegetación permanente en las acumulaciones de sedimentos variables.

El brazo secundario lateral muestra una mayor variabilidad en el ancho durante el transcurso de los años. Llegando a tener un ancho superior al inicial durante la formación de la isla grande, que pasaría de unos 700 m a unos 1000 m en la entrada, para después disminuir a su mínimo de 151 metros.



Ilustración 19: Landsat 19980821

Realizando unas medidas en años aleatorios, desde la primera toma de datos hasta la consolidación de la isla grande, se observa que los anchos se comportan de diferente manera dependiendo de si es entrada, salida o centro del brazo. Así, en la entrada es donde varían drásticamente unos centenares de metros pero de media se mantendría en los 700 metros. Los casos inferiores a 700 m son puntuales. En el centro y la salida observamos que los anchos también se ven afectados pero de una manera más moderada y manteniendo sintonía entre estos dos puntos.

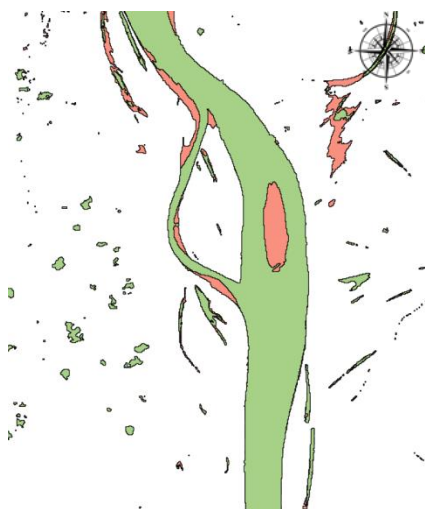


Ilustración 20: Imagen 20060928-20031209

El siguiente gran cambio se produce durante el año 2006, véase ilustración 20, con la acumulación de sedimentos en el canal principal. Esta nueva isla tiene unas dimensiones aproximadas de 3 km de largo por 800 m de ancho. En los años sucesivos el tamaño de la isla va variando pero cada vez una mayor parte queda como isla permanente. Es en el 2010 cuando ya se observa vegetación arraigada en el terreno. La isla del centro del canal principal se consolida con las dimensiones de su

primera aparición y con vegetación presente en todo el territorio que emerge. En los años consecutivos se observa cómo se acumulan sedimentos alrededor de ésta dando lugar a una formación más alargada. Las mayores dimensiones de la isla se dan en el año 2014 con una longitud de 6,7 km y un ancho de 1.6 km.

La formación de esta segunda isla, nueva isla central, divide el canal principal en dos brazos que discurren alrededor de la isla siendo ambos de anchos similares. Se debe considerar que el canal central aún siendo de un ancho similar es el de mayor envergadura pudiendo superar varios centenares de metros.



Ilustración 23: Landsat 20100721



Ilustración 22: Imagen 20100721-20060928

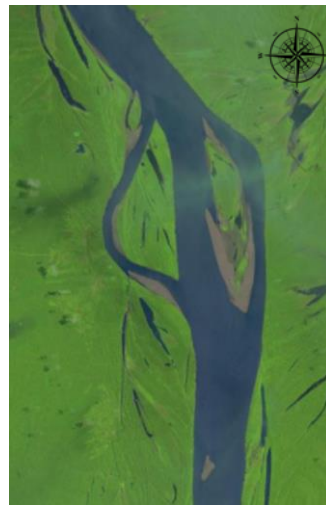


Ilustración 21: Landsat 20140918

Durante los años 2015 y 2016 la isla vuelve a sumergirse prácticamente en su totalidad, manteniendo solo las primeras zonas consolidadas con vegetación.

En el 2017 se produce una acumulación de sedimentos cerca de la entrada del canal del brazo secundario izquierdo y además se observa un desplazamiento de la isla central dirección aguas abajo. El resultado de este transporte de sedimento se prolonga un kilómetro aguas debajo de la salida del brazo secundario izquierdo permaneciendo como una estela de la isla central consolidada.

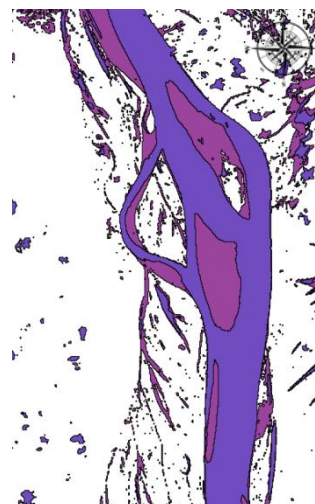


Ilustración 24: Imagen 20180929-20150820



Durante el 2018, véase ilustración 24, la nueva isla formada delante de la entrada del canal del brazo secundario muestra más superficie hasta su desaparición a finales del mismo año.

Durante el transcurso del tiempo analizado se ve como el proceso de la formación de las orejas se dan con una sedimentación inicial en una zona más o menos centrada del río y seguidamente una curvatura de los canales o brazos secundarios a medida que se forman las islas.

#### 4.2.2. Punto singular 2

<b>Morfología</b>	2
<b>Coordenadas (Lat., Long.)</b>	-3.9440 , -69.4023
<b>Tipo de formación</b>	Pétalos
<b>Casilla Landsat</b>	4063

#### Descripción:

El flujo de agua se da de sur a norte. La zona de estudio comprende una longitud de cauce de aproximadamente unos 11km y un ancho entre los márgenes más alejados de los brazos que la forman de 8.5 km.

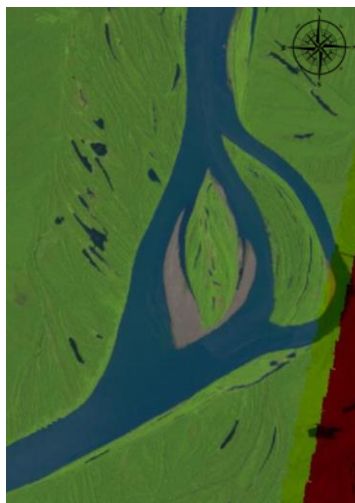


Ilustración 26: Landsat 19840915

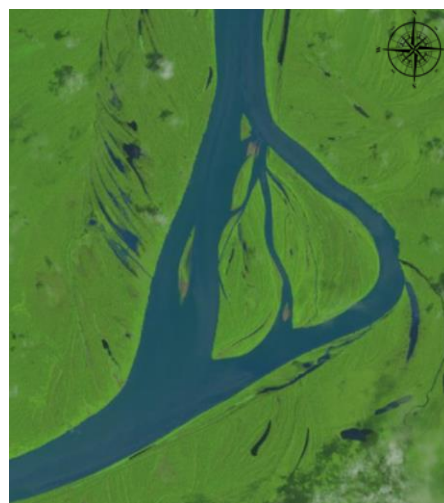


Ilustración 25: Landsat 20181202

De la primera imagen de 1984, véase ilustración 27, se observa dos islas sedimentarias de grandes dimensiones que ocupan prácticamente todo el centro de la morfología. De la imagen Landsat sin tratar se observa que en ambas islas está arraigada la vegetación. La vegetación nos informa de cuantos años ha existido la formación.

Las dos islas están rodeadas por tres brazos que serán nombrados como; izquierdo, central y derecho.

Se observa que el brazo izquierdo sigue un curso más directo hacia la salida de la morfología respecto a los otros brazos que forman parte del cauce del río. En cambio el brazo central y derecho se dirigen hacia el este y virando hacia el cauce principal dirección noroeste hacia el cauce principal.

Respecto a las islas, la isla izquierda tiene una forma más almendrada y con más restos sedimentarios en la parte alta del cauce que se sedimentan al chocar con ella. Y la isla de la derecha tiene una forma alargada con sedimentaciones en el cambio de dirección del brazo derecho hacia el cauce principal. Estas sedimentaciones se acumulan donde se produce una variación en las velocidades de diferentes masas de fluido que pasan de mayor velocidad a menor. Por lo tanto se sedimenta en las zonas con aguas más tranquilas y con menos influencia de las corrientes secundarias.

Al llegar al margen derecho, el agua lo erosiona y además, al colisionar, provoca el cambio de dirección debido a las fuerzas del codo.

En los años siguiente hasta 1996, véase ilustración 28, se observa como los diferentes brazos siguen la misma trayectoria pero con un claro estrechamiento del brazo central y el derecho.

La isla derecha presenta una superficie mayor, ocupando parte de los cauces izquierdo y central. Y la isla izquierda mantiene, a simple vista, la superficie con un ligero desplazamiento hacia el este debido a la erosión de un lado y la acumulación en el opuesto. Durante el transcurso de los

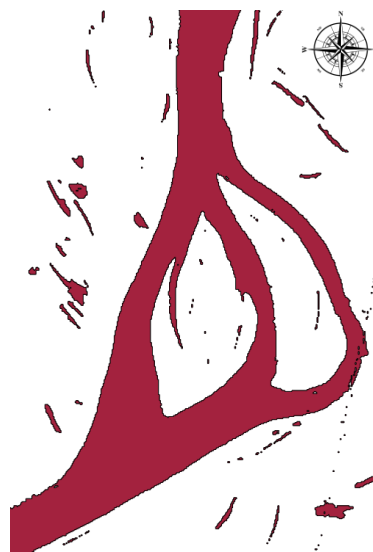


Ilustración 27: Imagen 19840915

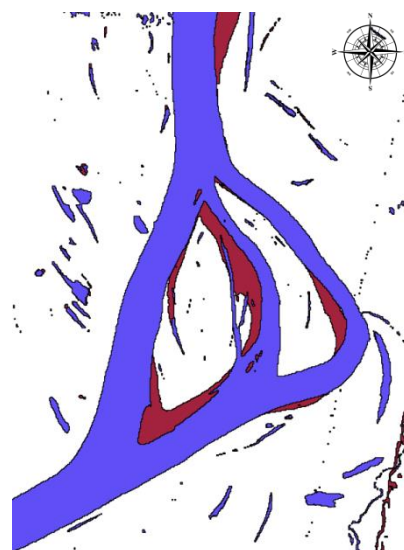


Ilustración 28: Imagen 19960815-19840915

años la acumulación de los sedimentos se hace estable presentando vegetación arraigada prácticamente en toda la isla observable, excepto en la punta aguas arriba y las sedimentaciones del brazo central.

Analizando los brazos existe una mayor separación entre el brazo izquierdo respecto al central y derecho. Estos últimos presentan un desplazamiento y estrechamiento que los hace variar centenares de metros. Inicialmente, en 1984, el brazo central tenía un ancho variable de unos 800 m y en 1996 de unos 400 a 500 m.

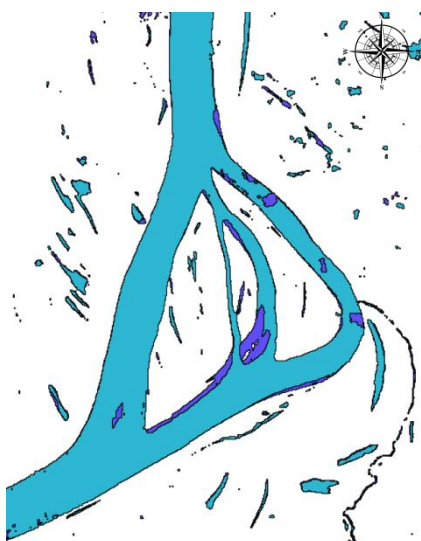


Ilustración 29: 19960815-20001013

En el periodo comprendido entre 1996 y 2000, véase ilustración 29, los brazos y las islas presentan un leve cambio. Se aprecia la creación de un pequeño canal en la isla izquierda provocado por la sedimentación en el centro del brazo central. Las zonas de color blanco son sedimentaciones consolidadas por vegetación y en el cauce central se observa la sedimentación sin consolidar (azul oscuro) con la superposición de las imágenes.

En los años sucesivos se observan el mismo comportamiento que el descrito. Las imágenes anteriores con la superposición de 20060624 a las anteriores y la comparativa con la imagen sin tratar muestran los cambios observables, véase ilustración 30 y 31.

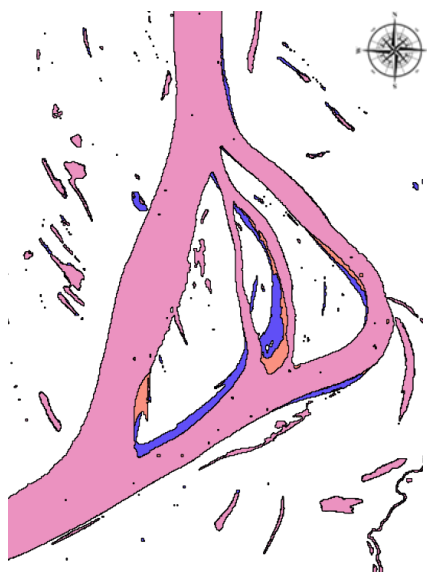


Ilustración 31: Imagen 19960815-20001013-20060624

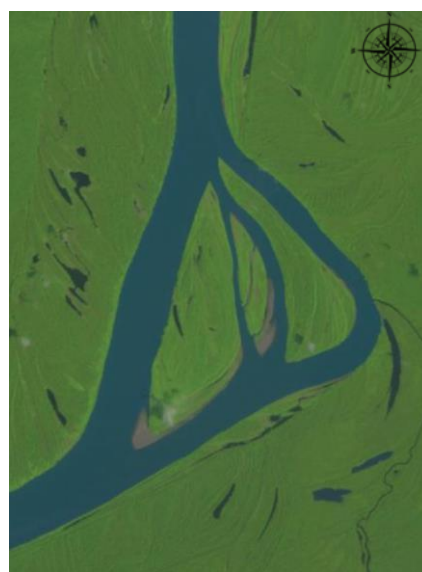


Ilustración 30: Landsat 20060624



La sedimentación en el brazo central es la tendencia en los años correlativos entre 2006 y 2009, véase ilustración 32, hasta prácticamente llenarlo y crear una sola isla, producido por la unión de la isla izquierda y derecha. Además el río empieza a sedimentar en el brazo izquierdo con la aparición de pequeños cúmulos de sedimento a parte de la acumulación aguas arriba de la isla izquierda pero esta vez hacia el centro del mismo.

Durante este mismo periodo el brazo central, dividido en dos pequeños cauces, sigue apareciendo en la época de mayor caudal del río.

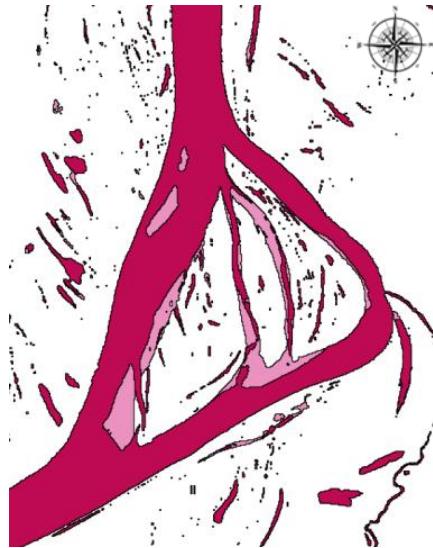


Ilustración 32: Imagen 20060624-20090920

En el año 2015 el brazo central es un pequeño cauce de unos 200 metros, véase ilustración 34. Siguen existiendo ambas islas como entes separados pero con variación en su forma. La isla izquierda más alargada debido a las sedimentaciones aguas abajo y erosión aguas arriba a causa de las sedimentaciones en el cauce izquierdo, y la isla derecha con una forma almendrada o de pera debido al desplazamiento lento pero constante del brazo derecho.

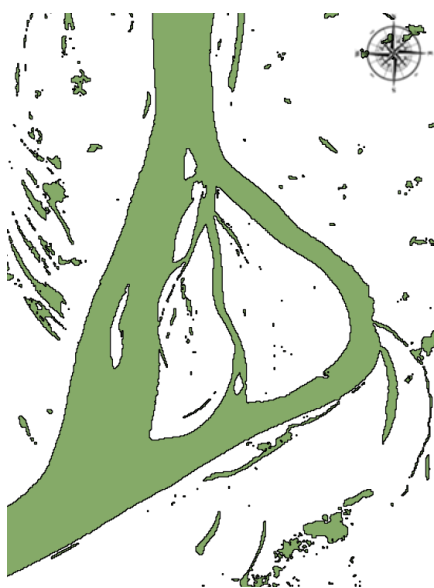


Ilustración 34: Imagen 20090803-20150921



Ilustración 33: Landsat 20150921

Otro detalle importante es la sedimentación de una isla alargada de mayores dimensiones en el centro del brazo izquierdo que las acumulaciones pasajeras anteriores. Esta sedimentación favorece la acumulación de sedimentos al final de la isla derecha.



En la imagen Landsat capturada en 2018, véase ilustración 35, se observa que la sedimentación en el brazo izquierdo disminuye considerablemente en los últimos tres años. Con la reducción de la isla central en brazo izquierdo se observa la reducción y partición de las sedimentaciones aguas debajo de la isla derecha. Cabe destacar que en todas las formaciones observables por encima de la lámina de agua se aprecian signos de vegetación arraigada.

Ilustración 35: Imagen 20181202

#### 4.2.3. Punto singular 3

<b>Morfología</b>	3
<b>Coordenadas (Lat., Long.)</b>	-4.3486 , -69.8285
<b>Tipo de formación</b>	Oreja (Nacimiento)
<b>Casilla Landsat</b>	4063

#### Descripción:

El flujo de agua discurre de noreste a sudoeste. El área de estudio es de unos 14 km de longitud de cauce y 2.5 km de ancho de cauce. En este caso la zona de estudio es más amplia debido al desplazamiento que se observará de las formaciones sedimentarias hacia aguas abajo.

Las imágenes siguientes corresponden a la primera imagen con buena visibilidad que corresponde a 1984, véase ilustración 36, y la última imagen, más cercana a la actualidad a 20190527, véase ilustración 37.



Ilustración 36: Landsat 19840915



Ilustración 37: Landsat 20190527

Antes de adentrarnos en la evolución de esta formación es de especial mención que se observa el nacimiento de una oreja. Por tanto, nos encontramos en una edad muy temprana de la oreja. Es difícil observar y predecir la estabilidad de esta en el tiempo así como su posible evolución.

La formación número 3 es captada en la imagen satelital de 19840915, véase ilustración 36, en el cauce principal del río Amazonas por seguir un curso más rectilíneo, que rodea un territorio de considerable tamaño junto a otro brazo de prácticamente las mismas dimensiones.

En el año mencionado, se observan unas deposiciones sedimentarias aguas arriba justo donde hace el codo en la esquina superior de la imagen. Este codo se forma por una protuberante acumulación de sedimentos en la orilla izquierda. Después, el punto más interesante, es la isla formada en el centro del cauce de forma almendrada y de 1.377 m por 460 m en su punto más ancho.



Ilustración 39: Imagen 19840915



Ilustración 38: Landsat 19840915



Ilustración 40: Imagen 19840915-19870924

Los siguientes años entre 1984 y 1987, véase ilustración 40, se siguen acumulando los sedimentos en las mismas zonas, anteriormente citadas. Es apreciable un desplazamiento de las acumulaciones de sedimentos hacia aguas abajo, y en la mitad izquierda del cauce siguiendo una línea desde la salida del codo hacia la isla central.

Este fenómeno es observable hasta el año 1991 que el comportamiento difiere con la formación de una nueva isla. Esta nueva isla se forma al aparecer un pequeño cauce de 90 m de media que separa la acumulación de sedimentos del codo. En las imágenes siguientes se puede apreciar en la superposición de estas, véase ilustración 41 y 42, el desplazamiento hacia aguas debajo de las formaciones en general y el pequeño cauce de la isla del codo. También en algunas zonas de la isla del codo se aprecia vegetación arraigada.



Ilustración 42: Imagen 19870924-19911105



Ilustración 41: Landsat 19911105

La apertura del pequeño cauce redirige el cauce principal entre los años 1991 y 1996, véase ilustración 43. Esto provoca el transporte de los sedimentos acumulados en el codo y la gran mayoría de los que formaban la isla en esta zona. Incluso alguna de las zonas de la isla sedimentaria, con vegetación, desaparecen. Es remarcable que la zona sedimentaria aguas arriba del codo crece y acumula sedimentos en la parte de aguas abajo.

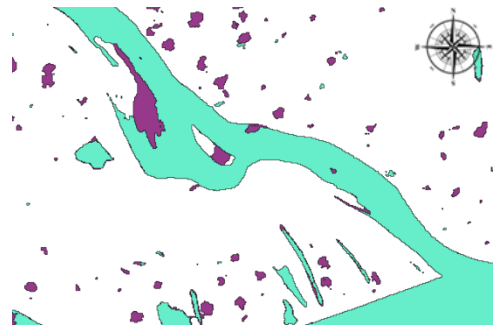


Ilustración 43: Imagen 19911105-19961019

Hasta el año 2005, véase ilustración 44, la acumulación de sedimentos por encima del codo hace desaparecer a éste creando una pequeña laguna bloqueada por la isla del mismo. Todas las zonas sedimentarias están completamente cubiertas de vegetación y son un indicio del nuevo curso que toma el río. Este sigue un curso rectilíneo en el cual se van acumulando sedimentos en la orilla derecha hasta unirse con toda acumulación en el centro del cauce.

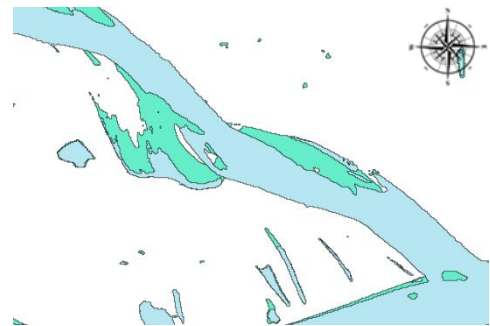


Ilustración 45: Imagen 19961019-20050808

Aguas debajo de esta formación se acumulan sedimentos en la orilla izquierda abarcando una gran superficie de 5 km a lo largo del curso inferior estudiado. Esta sedimentación dependiendo de la época del año y por tanto del caudal que transcurre por el río, va formando una isla. Esta isla es apreciable y definida en la superposición de la ilustración 45.



Ilustración 44: Imagen 20050808-20110724



Ilustración 46: Imagen 20110724-20151124

Finalmente, véase ilustración 46, el cauce del río sigue un curso prácticamente recto con la orilla derecha repleta de sedimento con vegetación, aunque sigue siendo una zona altamente inundable. En el año 2015, se observa un claro nacimiento de una formación en oreja que dura hasta la actualidad.

#### 4.2.4. Punto singular 4

<b>Morfología</b>	4
<b>Coordenadas (Lat., Long.)</b>	-4.2993 , -69.9219
<b>Tipo de formación</b>	Oreja (Nacimiento)
<b>Casilla Landsat</b>	4063

##### Descripción:

El flujo de agua fluye de noroeste a sudeste. La amplitud de la zona de estudio abarca 9 km de longitud del cauce y un ancho de 4 km.

La presente morfología se encuentra ubicada cerca de Umariacu (Tabatinga) en Brasil. Forma parte del brazo norte que rodea una gran isla. Las imágenes Landsat, sin tratar, véase ilustraciones 47 y 48, muestran la evolución desde la primera imagen tratable hasta la actualidad. Se aprecia una considerable variación entre el estado inicial de estudio y el actual. Se observa una ampliación del ancho del cauce y la formación de una oreja como hechos más remarcables.



Ilustración 49: Landsat 19840526



Ilustración 47: Landsat 20190527



Ilustración 48: Imagen 19840526



La primera captación satelital de 1984, véase ilustración 49, muestra un cauce de ancho variable en 1 km de media. Por la época del año se observan grandes sedimentaciones a las orillas del cauce y también en el centro de este. El estudio se centra en la evolución de la morfología a la altura de la isla sedimentaria del centro del cauce. Esta isla tiene



unas dimensiones de 1500 m de largo y un ancho máximo de 350 m con una forma alargada.

De las imágenes superpuestas de 1984, 1987 y 1988, véase ilustración 50, se aprecia el crecimiento de la isla central así como el desplazamiento de las orillas del cauce que se dirige al sur. La isla central no es una formación estable, sino que aparece en los meses comprendidos entre Agosto y Diciembre.

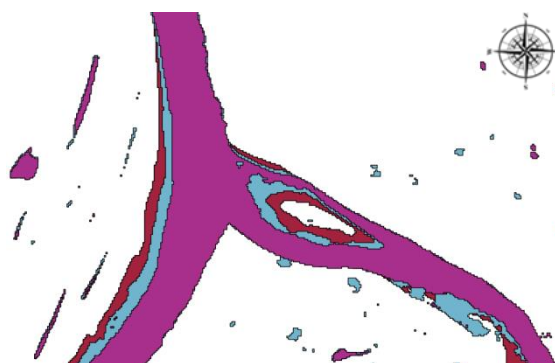


Ilustración 50: Imagen 19840915-19870924-19880825

Desde 1988 hasta 1996, véase ilustración 51, la isla sigue apareciendo y desapareciendo en los mismos periodos del año aunque se observa un desplazamiento hacia el suroeste que corresponde con un desplazamiento aguas abajo. Este desplazamiento es común con el desplazamiento de la bifurcación del río en este punto provocado por la minoración de la isla grande que rodea el Amazonas.

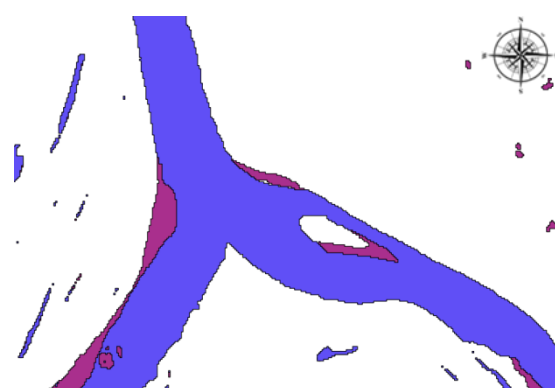


Ilustración 51: Imagen 19880825-19960815

En 1999, véase ilustraciones 52 y 53, se observa que no hay ningún rastro de vegetación sobre las sedimentaciones y por tanto explica su presencia temporal. Además cabe destacar que el cauce sigue aumentando por el brazo norte en contraposición con la disminución del ancho del brazo sur. El río sigue erosionando la isla en su vertiente norte y continua el desplazamiento de la bifurcación hacia el sur.

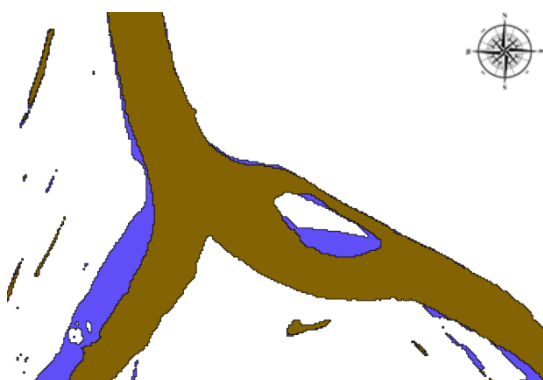


Ilustración 52: Imagen 19960815-19990824

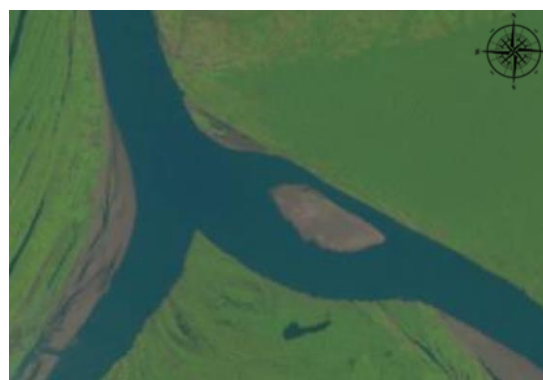


Ilustración 53: Landsat 19990824

Hasta el año 2001 la isla sigue el proceso de aparición y desaparición hasta convertirse en una isla permanente. Es en el año 2003, véase ilustración 54, en el cual se observa su estabilización con unas dimensiones de 3 km de largo por 700 m de ancho. Aparecen claros indicios de vegetación arraigada en la zona norte de la isla sedimentaria.

Los márgenes de las orillas se estabilizan y se aprecia el nacimiento de la oreja formada por el pequeño cauce que discurre por la parte norte de la isla sedimentaria, véase ilustración 55. Ahora, se considerará brazo al caudal que pasa por la parte superior de la isla.

Al estudiar en la salida del brazo se observa una sedimentación de 500 m de largo y 300 de ancho que permanece junto a la isla **y** se convierte en el punto con sedimentaciones más voluminosas.



Ilustración 55: Landsat 20030904



Ilustración 54: Imagen 19990824-20030904

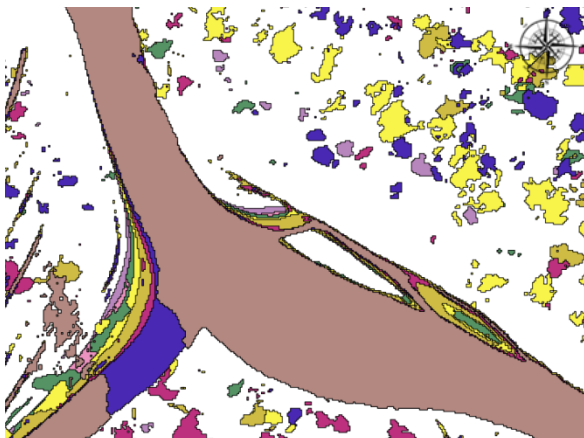


Ilustración 56: Imagen superposición 2003-2016

Debido al comportamiento presenciado durante el periodo comprendido entre 2003 y 2016 se observa en la superposición de 8 imágenes procesadas, véase ilustración 56, la isla como una entidad estable que mantiene sus dimensiones y posición con pequeños aumentos de decenas de metros pero sin considerarse relevantes.



El comportamiento del brazo sí que es de especial estudio al observar que el punto de entrada se va estrechando pasando de un ancho de 500 m a 200 m en 13 años. Y, también, es remarcable el desplazamiento de 600 m hacia el suroeste del lugar donde se produce el inicio del brazo a medida que se estabilizan los márgenes del brazo y se consolida éste. El desplazamiento puede corresponder al encuentro con una falla geológica que no permite su expansión tierra adentro. Aun así, cada vez esta



Ilustración 57: Imagen 20030615-20160812

formación característica se asimila más a oreja. Aguas abajo es constante el aumento de las sedimentaciones en la pequeña isla de la salida hasta su fusión con el margen izquierdo en algunos periodos del año. A medida que pasan los años la isla inferior adquiere unas dimensiones similares a la isla superior. La diferencia entre ambas islas es que sólo la isla inferior forma parte del margen izquierdo en algunos periodos de bajo caudal. A excepción del 2017 (20170809) cuando existe una gran sedimentación con inicio en la entrada del brazo izquierdo y ocupa un ancho de 1.3 km hacia el interior del cauce principal.



Ilustración 58: Landsat 20170809

#### 4.2.5. Punto singular 5

<b>Morfología</b>	5
<b>Coordenadas (Lat. ; Long.)</b>	-4.1752 ; -70.0015
<b>Tipo de formación</b>	Oreja
<b>Casilla Landsat</b>	4063

##### **Descripción:**

El flujo de agua discurre de noroeste a sudeste. La presente morfología corresponde a un área grande de estudio que comprende aproximadamente 18 km de longitud de cauce por 9 km de ancho. Esta formación es frontera de tres países; Brasil, Colombia y Perú. En la parte central, justo a la salida de la oreja, se sitúan la población de Leticia (Colombia) y Tabatinga (Brasil).

Es un ente complejo por la diversidad de elementos que lo comprenden. Las imágenes Landsat corresponden a 1984 y 2019, véase ilustraciones 59 y 60. A simple vista se observan múltiples cambios en el transcurso de 35 años que separan una imagen de la otra.

Desgranando esta configuración morfológica observamos que los elementos principales son comunes en ambas imágenes; una isla central, una oreja y varias islas sedimentarias. A continuación se procede con la descripción evolutiva de la morfología.



Ilustración 60: Landsat 19840915



Ilustración 59: Landsat 20190527



Ilustración 61: Imagen 19840915

El inicio de la evolución observable se inicia en 1984, véase ilustración 61. En esta imagen se observa una isla central de 9.400 m de longitud con un ancho de 1.500 m en su punto más amplio. La isla central comienza a 1.200 m de la entrada de flujo en la oreja del margen izquierdo. Esta oreja vuelve a unirse al cauce principal a unos 6.000 m aguas debajo de su inicio. Podemos establecer que las dimensiones de la isla que separa la oreja es de 6 km de largo por 2.2 km de ancho. Aguas abajo, al final de la isla central, existe una isla de menor tamaño 3.700 m con un

ancho de 900 m y otra de más pequeña prácticamente pegada en el margen izquierdo. En la imagen sin tratar, véase ilustración 60, se observa que existe vegetación en todas las islas que componen la formación.



Ilustración 62: Imagen 19840915-19870924

En 1987, véase ilustración 62, existe la misma configuración aunque se aprecia un aumento de sedimentaciones alrededor de la isla central, especialmente unas franjas situadas aguas arriba en el brazo izquierdo, también en la parte central y final en el brazo derecho. Se contabiliza una pequeña cantidad de sedimento en el brazo circundante de la oreja tocando a la isla y la formación de una isla a la salida de este de 1.200 metros de largo y 600 metros de ancho.

Al año siguiente en 1988, véase ilustración 63, en la misma época del año se observan grandes sedimentaciones. Están localizadas en los mismos puntos en la isla central provocando la unión con la isla menor aguas abajo. Se forma otra isla en el brazo derecho justo por encima de la isla menor, con unas dimensiones de 1.600 m de largo por 500 m de ancho.

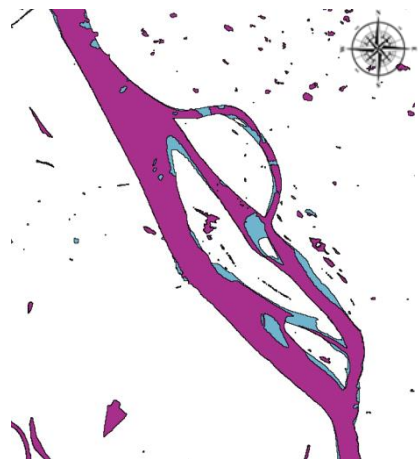


Ilustración 63: Imagen 19880825-19870924

Son remarcables las sedimentaciones en el brazo derecho con el aumento de la isla a la salida del brazo circundante que forma la oreja y una prolongación de la isla colindante a Leticia en proceso de fusión con el margen izquierdo, véase ilustración 64.



Ilustración 64: Landsat 19880825

Durante los siguientes años el cambio producido es el crecimiento, tanto de longitud como de ancho, de la isla central ya que el principal punto de sedimentación es en la parte central de la isla por el lado del brazo derecho, véase ilustración 65. Por lo demás se observan las sedimentaciones habituales en el margen izquierdo del brazo izquierdo y la aparición y desaparición de la isla sedimentaria de 1.200 m a la salida del brazo circundante de la oreja justo en el centro del brazo derecho. La oreja permanece prácticamente con las mismas

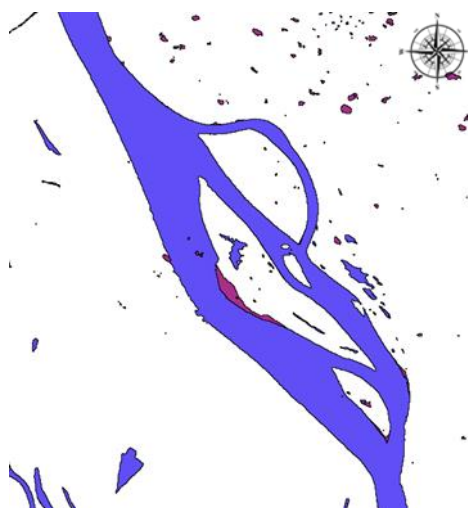


Ilustración 65: Imagen 19880825-19960815

dimensiones con pequeñas variaciones de decenas de metros dependiendo de la época del año. La vegetación se hace permanente en prácticamente la totalidad de la isla central y de la isla menor.

Es en 1998, véase ilustraciones 66 y 67, cuando se observa una segunda gran sedimentación en todo el curso del río. En los puntos habituales siguen apareciendo sedimentaciones como serie en el centro del brazo circundante, el margen izquierdo aguas abajo por encima de Leticia y el considerable aumento de la isla central con sedimentaciones por todo el perímetro izquierdo y en la punta superior aguas arriba. Se acumula una cantidad de sedimentos sobre la isla menor de 1.600 m de longitud y 900 m de ancho. También la isla a la salida del brazo circundante

aumenta su superficie hasta los 2.700 m y 700 m de ancho. Esta vez la isla supera con creces la salida de la oreja sobrepasando hacia aguas arriba 1.200 m. Curiosamente la isla central y la menor no se unen, todo y las sedimentaciones producidas en esta área, por la subsistencia de un canal de unos escasos 250 m.

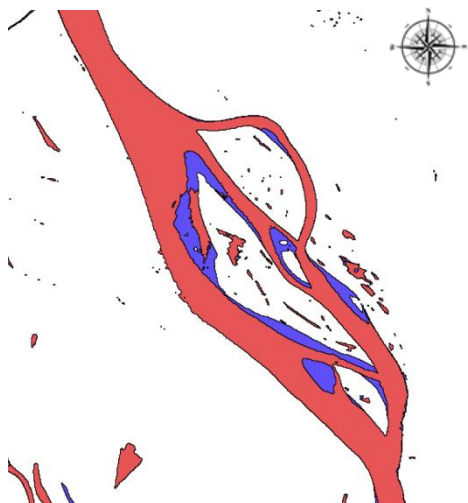


Ilustración 67: Imagen 19960815-19980825



Ilustración 66: Landsat 19980825

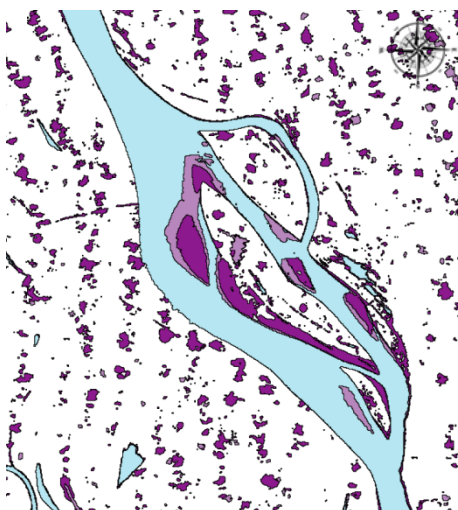


Ilustración 68: Imagen 20000623-20030904-20050808

La superposición de imágenes del 2000 al 2005, véase ilustración 68, muestra cómo sigue habiendo periodos en los cuales las sedimentaciones descritas a lo largo de la zona de estudio desaparecen hasta recuperar una imagen similar a la de año 1984. En periodos de grandes sedimentaciones es cuando se observa la aparición de la isla al final del brazo circundante y esta no se hace estable hasta el año 2003 aunque en algunos años posteriores puede llegar a disminuir considerablemente su tamaño.

En esta misma imagen, las sedimentaciones en la zona superior de la isla central adquieren mayor importancia, y se acumulan por todo el perímetro derecho de esta con una amplitud máxima de 1.400 m. Este hecho se produce en diferentes etapas; primero con la aparición de una isla de 2.000 m en la zona media del brazo derecho y seguidamente con la unión de esta a la isla central.



El brazo derecho, además de la isla al final de la oreja, acumula sedimentos en áreas cercanas a Leticia de varios centenares de metros. Este canal ya no sigue el mismo curso rectilíneo que antes, ya que se observan sedimentaciones a ambos lados de los márgenes. Especial mención al estrechamiento de este brazo a la altura del principio de la isla central debido a las sedimentaciones en esta.

En el año 2005 se observa el desplazamiento del brazo derecho, debido a las sedimentaciones en su margen izquierdo, erosionando una franja de 250 metros en el margen derecho, franja que se continuará produciendo a partir de este momento.

La imagen muestra la erosión en el margen izquierdo con una superposición inversa, véase ilustración 69. Es a partir de las deposiciones sedimentarias en el brazo izquierdo que se produce este fenómeno. Esto confirma un aumento de la tensión de fondo debido a la circulación de más caudal por este brazo.

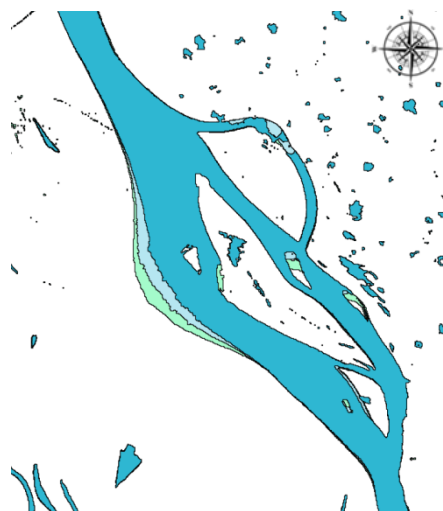


Ilustración 69: Imagen 20080816-20050808-20001013

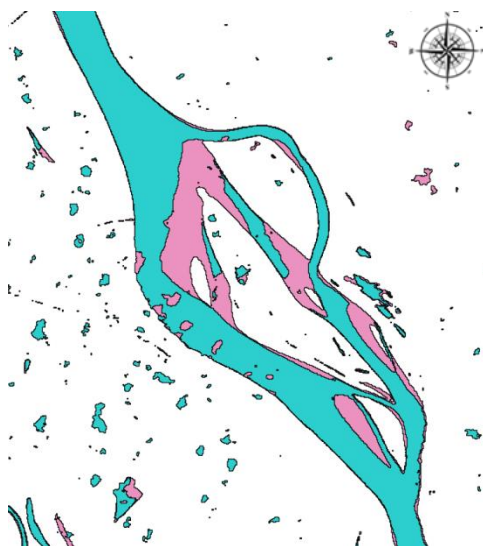


Ilustración 70: Imagen 20060624-20060912

La siguiente imagen muestra la variabilidad del río en un mismo año entre junio y septiembre. Esta imagen está formada por la superposición de 20060624 y 20060912, véase ilustración 70. En color rosa nos situamos en Junio del 2006 y en azul, momento de máxima sedimentación, nos encontramos en Setiembre del mismo año. Asimismo se aprecia en color blanco las zonas de sedimentos consolidados y consideradas ya como islas con vegetación arraigada.

De las sedimentaciones producidas se puede concluir que en el brazo izquierdo se presenta cada vez mayor superficie de sedimento, encontrándonos en periodos del año en el cual está completamente bloqueado el paso del flujo de agua. Y, a medida que el brazo izquierdo queda más sedimentado se produce en el brazo derecho una erosión en la superficie del margen izquierdo para dejar paso al caudal desviado. Con esto se va modificando el curso del río hasta adquirir una nueva configuración y vía de flujo, véase ilustración 71.

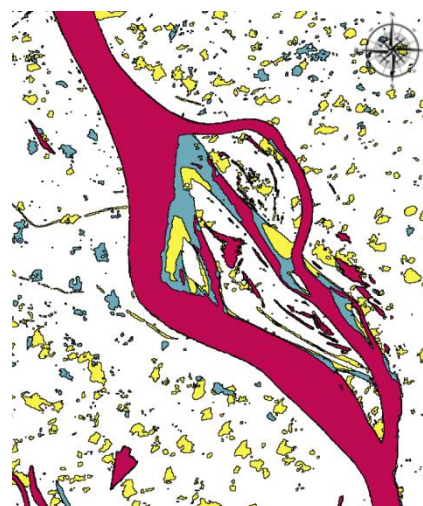


Ilustración 71: Imagen 20090803-20090904-20090920

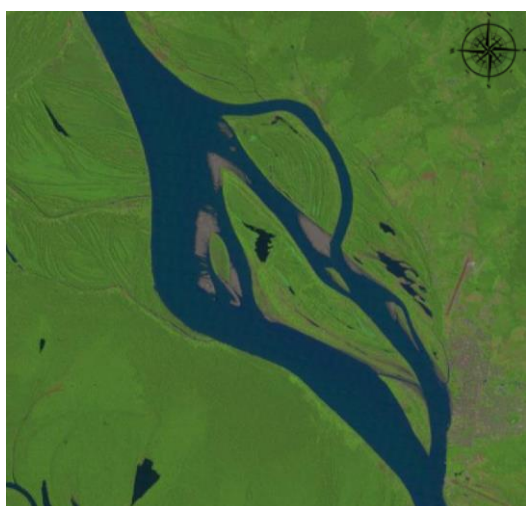


Ilustración 72: Landsat 20100721

La imagen Landsat del 2010, véase ilustración 72, muestra los cambios producidos en los años analizados. Se ve claramente que la oreja está prácticamente inalterada. El canal izquierdo muestra varios cúmulos de sedimentos además de aquellos que ya se convirtieron en islas al tener vegetación. La isla central y la menor continúan separadas por un estrecho canal pero la isla central cada vez abarca más superficie hasta que se acaban uniendo definitivamente. Y por último observamos el brazo derecho que presenta un ancho mayor que anteriormente, debido a la desviación del caudal por este ramal. Este brazo también cuenta con islas en su parte central y con acumulación de sedimentos en el saliente de la isla central.

La erosión en el margen derecho del mismo brazo derecho es cada vez mayor, con un aumento de centenares de metros al año. Para mostrar este hecho, se realiza la superposición de dos imágenes de los años 2011 y 2015. Es durante estos años cuando se producen los mayores cambios y mayor superficie erosionada. Las imágenes se comparan realizando la superposición cronológica entre los años 2015 sobre 2011, véase ilustración 73, y su inversa 2011 sobre 2015, véase ilustración 74. Con la primera se observa que en el año 2015 se forma una isla sedimentaria en el brazo derecho de color azul y algunas sedimentaciones a lo largo de

toda la formación. En la superposición inversa observamos como en color fucsia (2015) ha erosionado el margen derecho en comparación con la imagen azul del 2011.



Ilustración 74: Imagen 20110809-20150820



Ilustración 73: Imagen 20150820-20110809

Por último, con la imagen de mayor nitidez del 2018 y en superposición con una imagen del 2015, véase ilustración 75, se observa que la tendencia es de sedimentar y bloquear el paso del brazo central entre la isla grande y la isla de la oreja, y continuar con las sedimentaciones en el lado derecho que, al ser la zona con más anchura es donde baja la velocidad del flujo y produce las sedimentaciones en las zonas más calmadas.

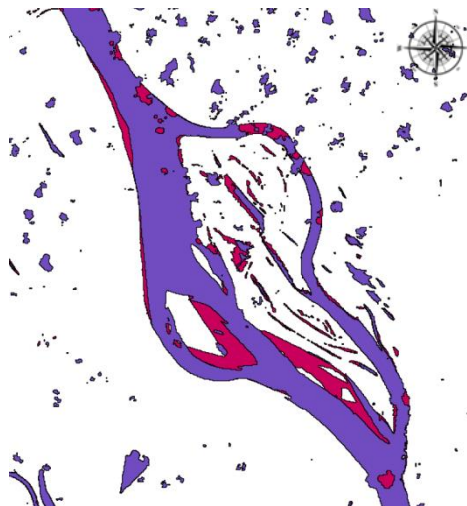


Ilustración 75: Imagen 20150820-20180929



#### 4.2.6. Punto singular 6

<b>Morfología</b>	6
<b>Coordenadas (Lat., Long.)</b>	-3.8645 , -70.5985
<b>Tipo de formación</b>	Oreja
<b>Casilla Landsat</b>	4063

##### Descripción:

El caudal de agua fluye en sentido oeste-este. La zona de estudio comprende una longitud de cauce entre la entrada de la formación y la salida, y en línea recta, de 15 km. Y abarca, en su ancho máximo, una distancia entre ambos márgenes más alejados de 8.5 km.

Esta formación corresponde al último tramo del río Amazonas compartido entre Colombia y Perú y por tanto es frontera entre países.

Las imágenes, inicial y final, del estudio corresponden a los años 1984 y 2017. De estas imágenes observamos el cambio del proceso que se pueden resumir en el cambio de anchos de brazo y la consecuente formación de una oreja.



Ilustración 77: Landsat 19840915



Ilustración 76: Landsat 20170809

El inicio del estudio empieza con una imagen de 1984, véase ilustración 76. El cauce entra a la formación con un ancho aproximado de 1.000 m y se va ensanchando hasta un punto donde se bifurca en dos brazos. Estos son de un ancho similar y rodean varias islas con vegetación y otras solo de sedimentos. Los brazos adquieren los nombres de su posición mirando hacia aguas abajo. Así tenemos que el brazo superior de la imagen es el brazo izquierdo y el inferior el derecho. En la unión de los brazos, y salida de la formación, el cauce se estabiliza durante varios kilómetros con un ancho de 1.800 m.

El brazo derecho tiene un ancho en el punto de bifurcación de la isla central de 1.500 m. Este se va estrechando hasta los 860 m. El trazado sigue una forma curva y en su zona media hay gran cantidad de zonas recientemente sedimentadas. Se encuentra una isla en punto más ancho, antes de iniciar la curva, y tiene unas dimensiones de 1.700m de largo por 800m de ancho con forma de almendra. Además existe un gran volumen de sedimentos que amplían la isla central.



Ilustración 78: Imagen 19840915

Las sedimentaciones en el brazo son producidas al existir una amplia zona central con un ancho superior al de la entrada. Así la velocidad disminuye y produce las sedimentaciones en esta zona central.

Como se observa en la ilustración 78, las sedimentaciones están producidas en la zona de mayor amplitud y producen el estrechamiento del brazo hasta la salida. En cambio el brazo izquierdo sigue una trayectoria con tendencia rectilínea hasta el punto de salida. También se observan pequeñas zonas sedimentadas en el margen y la formación de una isla detrás de la ya existente.

En 1986, véase ilustración 80, hay una disminución de las sedimentaciones en toda la formación. Sí que aumenta la superficie de la isla formada en el centro del brazo derecho pero la gran zona sedimentada anexionada a la isla central, esta disgregada con la aparición de pequeños cauces que la cruzan. Un factor posible es el análisis de la imagen en un momento de mayor caudal en la zona.



Ilustración 79: Landsat 19860804

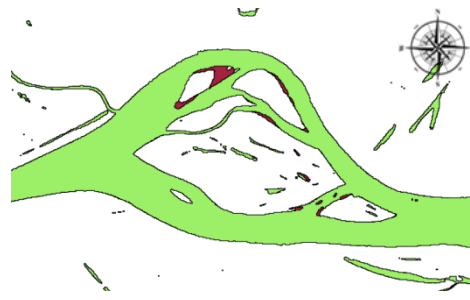


Ilustración 80: Imagen 19840915-19860804

Durante los años sucesivos el funcionamiento es similar variando de un estado de grandes sedimentaciones cuando pasa por estaciones de menor caudal.

La superposición del año 1991 sobre 1986, véase ilustración 81, muestra la combinación de la totalidad de islas de la morfología formando una de sola. Es en este punto es cuando se aprecia una forma más clara de oreja ya que el brazo derecho ha ido disminuyendo de ancho perdiendo importancia.

La unión de las islas se produce debido al choche de las partículas de sedimento al entrar en contacto con los diversos elementos del brazo y debido al

taponamiento de los cauces circulantes por el interior de la isla que ben taponada su salida debido a la fuerza del caudal del brazo derecho. Así es como el brazo izquierdo pasa a ser el principal debido a la mayor carga de caudal fluyendo por él.

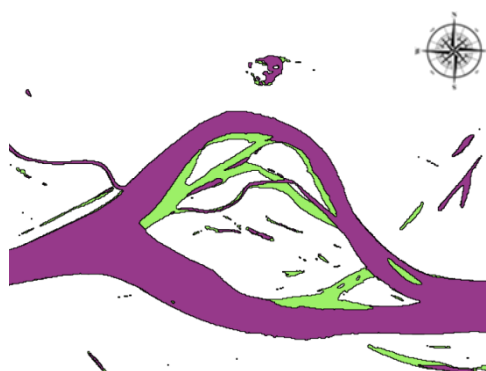


Ilustración 81: Imagen 19860804-19911005

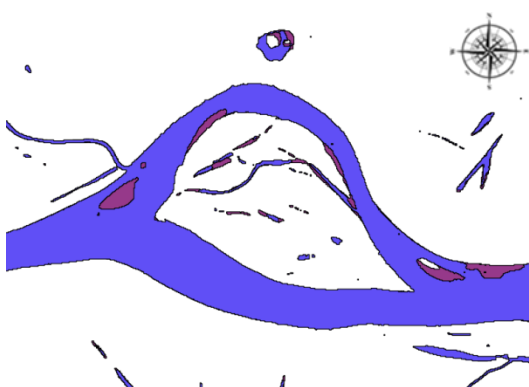


Ilustración 82: Imagen 19911005-19960815

Las grandes sedimentaciones producidas han aportado una cantidad de sedimentos suficiente para crear una sola isla permanente prácticamente en la totalidad de su superficie, a excepción de los pequeños cauces que cruzaban y separaban la isla que han ido desapareciendo.

En el año 1996, véase ilustraciones 82 y 83, quedan pocos restos de los antiguos cauces que dividían la gran isla. Se observa que en estos pequeños cauces sigue habiendo sedimentaciones hasta su desaparición. Las otras sedimentaciones se producen en la entrada y en la salida del brazo derecho y algunas deposiciones en el margen derecho de este. Las deposiciones en el margen derecho se producen debido a las corrientes secundarias generadas por los vórtices de los márgenes. Erosionan los



Ilustración 83: Landsat 19960815

márgenes exteriores y expulsan el material hacia el centro del canal que se acumula en las zonas con velocidades más bajas. En cambio las sedimentaciones a la entrada y a la salida son

debidas a la distinta fuerza específica entre el flujo del canal derecho, que ya es el principal, y el canal izquierdo. Estas acumulaciones se producen en estas zonas más anchas del brazo y provocan el estrechamiento del mismo.

El estrechamiento del brazo izquierdo es y será la propensión de la morfología de la zona debido al cambio de corrientes en el río. Bien establecido el cauce derecho como cauce principal, ya es necesario cambiar la terminología de los elementos por; cauce principal para el brazo derecho y brazo de oreja para el brazo izquierdo.

La acumulación de sedimentos, véase ilustración 84, se sigue dando tanto a la entrada y salida del brazo de oreja como en punto medio. Los sedimentos se acumulan debido a las corrientes secundarias en el margen interior ya que el río tiende a erosionar el margen derecho debido a las fuerzas que causan el cambio de dirección. El margen derecho queda como el margen de

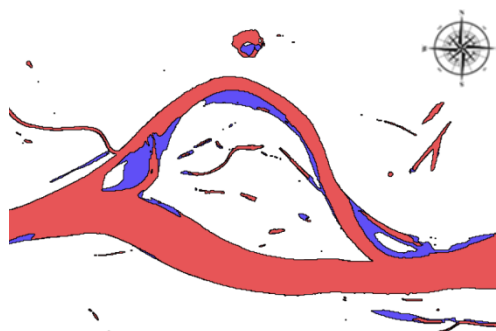


Ilustración 84: Imagen 19960815-19980821

acumulación ya que las partículas se acumulan en estas zonas menos profundas y con velocidades inferiores.

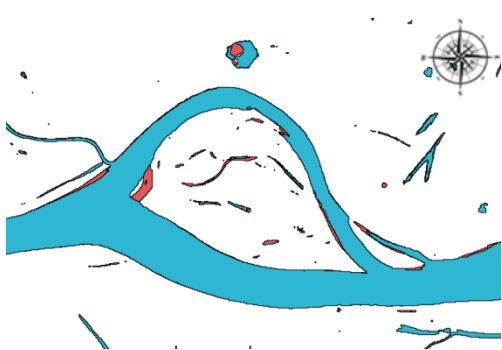


Ilustración 85: Imagen 19980821-20001013

Durante el periodo comprendido entre 1998 y 2017 los cambios observables son relativamente pequeños. El brazo de la oreja tiende a estrecharse. Se han realizado mediciones durante estos años de la entrada, el punto medio y la salida de la oreja. En los tres puntos, aunque hay fluctuación, las distancias cada vez son más reducidas siendo estas de decenas de metros al año. De todas maneras al depender de las sedimentaciones en estos tres puntos que son los más usuales, es difícil extraer conclusiones.

En relación al cauce principal este a medida que pasan los años va aumentando su ancho y es apreciable como va desplazando su estrechamiento hacia aguas abajo.

Por último observar que en la imagen superpuesta de 2014 con 2017, véase ilustración 87, se observa la aparición de una gran isla sedimentaria en el centro del cauce principal. Esto se

debe a la ampliación de la sección de paso donde la velocidad baja y entonces se produce la sedimentación. Así que esto puede ser un punto de inflexión para la dinámica de la morfología.



Ilustración 87: Landsat 20040922

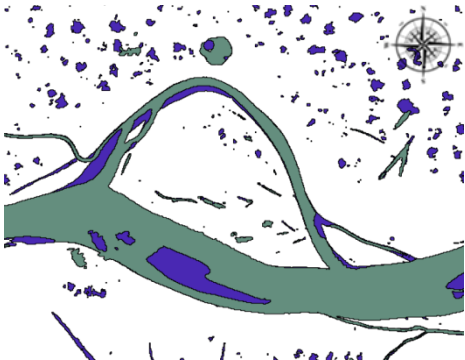


Ilustración 86: Imagen 20140801-20170809

#### 4.2.7. Punto singular 7

Morfología	7
Coordenadas (Lat., Long.)	-3.8771 , -70.7059
Tipo de formación	Trébol
Casilla Landsat	4063

#### Descripción:

La corriente fluye de sudoeste a noreste. El área de estudio comprende una longitud de cauce de 15 km y un ancho total, desde los márgenes más alejados de la formación, de 10 km.

La morfología presenta un cambio significativo en los 33 años observables de las imágenes Landsat. El inicio de la observación se produce en 1984, véase ilustración 88, y finaliza como última imagen de buena visibilidad en 2017, véase ilustración 89.

Los elementos principales de la morfología comprenden; el brazo izquierdo, el brazo central y el brazo derecho, la isla superior y la isla inferior, izquierda y derecha respectivamente, y la oreja nueva.



Ilustración 89: Landsat 19840915



Ilustración 88: Landsat 20170908

En 1984, el cauce entraba en la morfología en un ancho de cauce de 1.300 m y seguidamente se bifurcaba en dos brazos; el central y el derecho, véase ilustración 90. Estos presentan unos anchos de 1.750 m y 1.120 m respectivamente. Esto puede dar respuesta a la formación de la isla inferior por la disminución de velocidad en este tramo del río.



Ilustración 90: 19840809

El brazo derecho es un canal curvo con un ancho que se va reduciendo en la parte central para volver a recuperar distancia entre márgenes, en la salida hacia el canal central. Se observan deposiciones sedimentarias en el margen izquierdo que corresponde con la isla inferior.

El brazo central mantiene durante 3.2 km el ancho de entrada a la formación y se ve modificado debido a la bifurcación, producida por la isla superior, con el consecuente nacimiento del brazo izquierdo. Después de este punto sigue una trayectoria rectilínea, durante 5.1 km, en el cual va disminuyendo su tamaño hasta un mínimo de 900 m de ancho donde seguidamente va aumentando debido a la unión de ambos brazos laterales. Las sedimentaciones se producen en el margen derecho en contacto con la isla inferior que agranda su superficie por ambos márgenes posteriores.

El brazo izquierdo, circundante a la isla superior, tiene una forma muy característica de oreja. Muestra grandes acumulaciones de sedimentos en ambos márgenes antes de su punto central y va adquiriendo un ancho similar en todo su recorrido.





Ilustración 91: Imagen 19840915-19880825

La superposición de la ilustración 91 muestra como el cauce presenta la misma disposición morfológica. Los cambios producidos en este periodo de tiempo son la acumulación de sedimentos alrededor de la isla inferior, desde su mitad hacia aguas abajo y la reducción del ancho de canal del brazo izquierdo, debido a las grandes sedimentaciones acumuladas en ambos márgenes, de 720 m a 390 m.

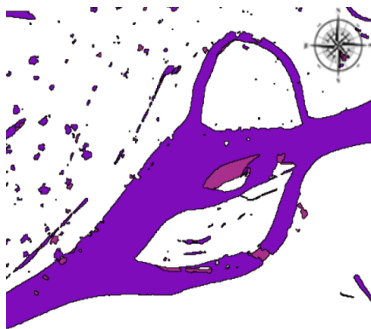


Ilustración 92: Imagen 19880825-19950728

Entre los años 1988 y 1995, véase ilustración 92, se recupera el ancho del brazo izquierdo hasta 620 m debido a la estabilización de los márgenes. Sabiendo que este dato es variable dependiendo de la época del año, podemos afirmar la estabilización por la aparición de vegetación en las antiguas zonas sedimentarias.

La isla superior ve modificada su superficie por una disminución de centenares de metros cuadrados. Este detalle se observa en la superposición inversa, véase ilustraciones 93 y 94, mostrando en color lila la imagen de 1995 y en color violeta la de 1988. Este cambio reduce la longitud del brazo izquierdo en 1.500 m. Además, esto produce que el canal central aumente de ancho, de 1.700 m hasta los 3.000 m, midiendo desde el nacimiento de la isla superior hasta el margen de la isla inferior.



Ilustración 94: Landsat 19950728

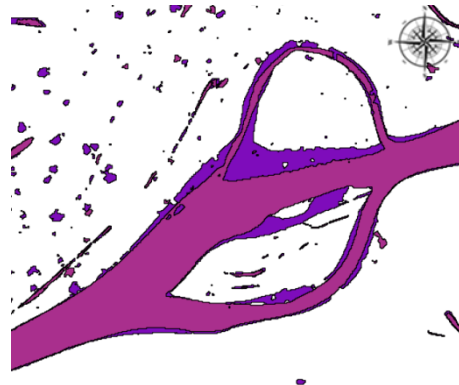


Ilustración 93: Imagen 19950728-19880825



El ensanchamiento del brazo central provoca una disminución de la velocidad del caudal y da lugar a la aparición de una isla que surge sólo en las épocas de menor carga hidráulica superficial.

En las siguientes imágenes correspondientes a la superposición de los años 1995 y 1998 y de los años 1998 y 2004, véase ilustraciones 95 y 96, se reconoce la mutabilidad de las sedimentaciones en el brazo central. De todos modos algunas zonas son más persistentes y es sobre estas que se configura la nueva disposición.



Ilustración 95: Imagen 19950728-19980821

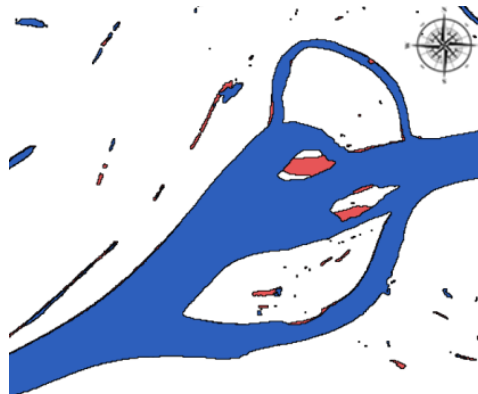


Ilustración 96: Imagen 19980821-20040922

Es posible distinguir en la comparación anterior que la isla superior es erosionada aguas arriba con la formación de las nuevas islas en el canal central. Esto provoca un desplazamiento y merma de la oreja hacia aguas abajo.

Por lo que respecta al brazo derecho, durante este periodo hay pocos cambios y sedimentaciones usuales.

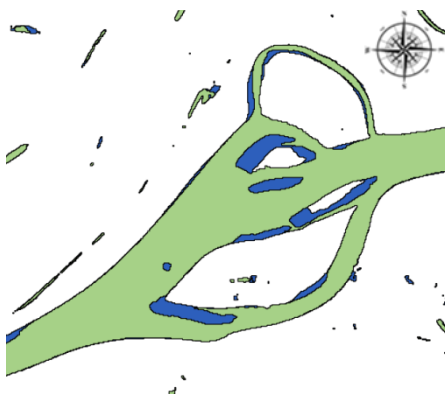


Ilustración 98: Imagen 20040922-20060928



Ilustración 97: Imagen 20060928-20081003

Diferentes configuraciones de islas en los años 2004 y 2008, véase ilustraciones 97 y 98.

Según las islas centrales derivan a la constitución de una sola, la isla inferior aumenta en centenares de metros cuadrados su superficie. La oreja formada alrededor de la isla superior queda totalmente desplazada por la erosión sufrida en el transcurso de los últimos años haciendo variar su forma.

La isla central se constituye formalmente en 2010 a partir de la isla sedimentaria más estable. Esta pequeña isla es de tan solo 1.200 m de largo por 400 m de ancho. Durante los siguientes años se acumulan sedimentos, principalmente alrededor de esta, hasta llegar a unas dimensiones de 4 km de longitud por 2.4 km de ancho.



Ilustración 100: Imagen 20081003-20090920



Ilustración 99: Imagen 20090920-20140918



Ilustración 102: Landsat 20140918



Ilustración 101: Imagen 20140918-20170809

En la última imagen analizada entre los años 2014-2017, véase ilustración 102, con todos los nuevos elementos instaurados, deducimos la formación de una nueva oreja. Está estará constituida alrededor de la isla central que ocupa el lugar de la anterior isla superior. Además se acumulan sedimentos en el margen izquierdo aguas arriba, y en su punto medio, para iniciar

el proceso de curvatura del brazo de oreja. A la salida del brazo de antigua oreja se acumula sedimentos por la variación de velocidades provocada por el cruce de flujos con diferentes fuerzas específicas.

#### 4.2.8. Punto singular 8

<b>Morfología</b>	8
<b>Coordenadas (Lat., Long.)</b>	-3.9311 , -70.8348
<b>Tipo de formación</b>	Oreja (muerte)
<b>Casilla Landsat</b>	4063

#### Descripción:

El flujo de agua viaja de oeste a este. El área de estudio se enmarca en 8 km de longitud y una distancia máxima entre los márgenes más alejados de 4.8 km.

El análisis de esta oreja se reduce a la observación de su desaparición. Es el único ejemplo adjuntado en este proyecto que corresponde a este proceso. Aun así la desaparición de esta oreja es inmediata al taponarse el punto de entrada. En la primera imagen satelital de 1984 ya observamos sedimentaciones en los márgenes próximos a la entrada del brazo de oreja. Y se observa durante todos los años este mismo fenómeno hasta que en 1991 queda taponada la entrada por completo. Así al dejar de haber flujo a través del brazo, y al suponer que este brazo tiene un calado pequeño, se produce su desaparición al crecer vegetación en él. Véase el proceso en las ilustraciones 103 a 106.



Ilustración 104: Landsat 1984

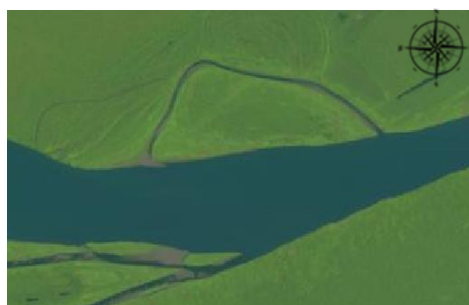


Ilustración 103: Landsat 1991



Ilustración 105: Landsat 1998



Ilustración 106: Landsat 2017

## 5. Análisis Físico

El presente apartado describe el fenómeno físico observado en las imágenes satelitales descritas anteriormente. Así se formula la hipótesis que, basada en la cantidad de movimiento como entidad básica, da respuesta al flujo de cantidad de movimiento y a la fuerza en exceso por curvatura. Así es necesario describir que es la cantidad de movimiento y su formulación.

### 5.1. Cantidad de movimiento y flujo de cantidad de movimiento

La cantidad de movimiento, o también llamado momentum, se define como la magnitud física de tipo vectorial que describe la cantidad de movimiento de un cuerpo. Esta magnitud viene representada por el producto de la masa y velocidad del objeto de estudio.

$$p = mu = \rho Vu$$

Dónde:

$p$ : Cantidad de movimiento

$m$ : Masa

$u$  : Velocidad

$\rho$ : Peso específico

Definida la cantidad de movimiento ( $p$ ), la entidad base del estudio, se plantea el concepto de flujo de cantidad de movimiento. Para dar a conocer la formulación de la cantidad de movimiento es necesario realizar el desarrollo de una sección de control ideal de canal en la cual se reflejarán todas las fuerzas implicadas en el flujo del agua.

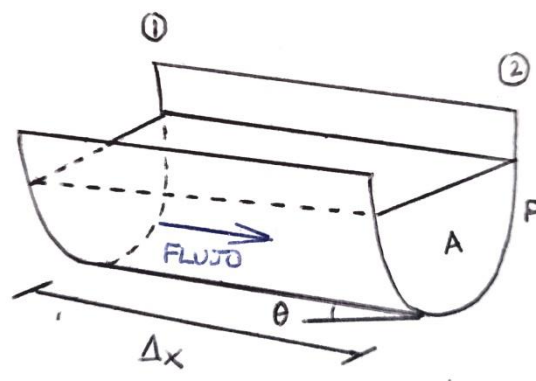


Ilustración 107: Volumen de control

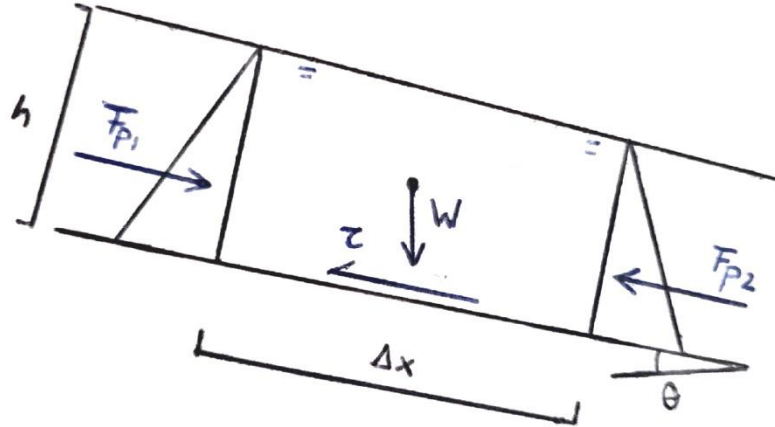


Ilustración 108: Equilibrio de fuerzas

$$\Sigma F = \rho Q [\Delta u]$$

$$F_{p1} - F_{p2} + W \sin \theta - \tau_0 P \Delta x = \rho Q (u_2 - u_1)$$

Se substituye  $F = \gamma h A$ ,

$$\gamma h A_1 - \gamma h A_2 + \gamma A \Delta x \sin \theta - \tau_0 P \Delta x = \rho Q u_2 - \rho Q u_1$$

Se agrupan los términos según las secciones de estudio 1 i 2,

$$(\gamma h A_1 + \rho Q u_1) - (\gamma h A_2 + \rho Q u_2) = \tau_0 P \Delta x - \gamma A \Delta x \sin \theta$$

De la anterior expresión se obtiene la formulación de la fuerza específica de una sección, elemento indispensable para la evaluación del flujo y la hipótesis que se desarrolla posteriormente. Se confirma que la fuerza específica es la cantidad de movimiento de la sección (M).

$$M_1 - M_2 = \tau_0 P \Delta x - \gamma A \Delta x \sin \theta$$

$$M = \gamma h A + \rho Q u$$

Dónde:

$M$ : Fuerza específica	$Q$ : Caudal
$\tau_0$ : Tensión de fondo	$u$ : Velocidad
$\gamma$ : Peso específico	$W$ : Peso
$h$ : Calado	$P$ : Perimetro
$A$ : Área de la sección	$\theta$ : Angulo de inclinación
$\rho$ : Densidad del fluido	$Fp$ : Fuerza de presión

El concepto de flujo de cantidad de movimiento es la variación de fuerza específica en la sección debido a las fuerzas actuantes en la sección. Las fuerzas mostradas anteriormente representan las fuerzas de presión hidrostáticas, el peso del fluido y la tensión de fondo. Con esto se añade la velocidad al sistema para evaluar el movimiento de éste y el flujo del agua en la sección de estudio.

## 5.2. Hipótesis

La hipótesis de esta tesina, después de observar el fenómeno a través de las imágenes satelitales, se basa en el concepto de flujo de cantidad de movimiento aplicado en una curvatura. Esta curvatura se asocia al brazo formado en las orejas de estudio. Afirma que cuando existe un flujo de partículas, con una determinada cantidad de movimiento, esta aumenta debido al aumento de la fuerza neta por causa de la curvatura. Así este aumento se ve reflejado en una mayor tensión de fondo al final de la curvatura.

Para el desarrollo se considera la sección como un cuerpo rígido sometido a un movimiento radial. Solo se considera la fuerza específica, en la entrada el tramo y a la salida, y la fuerza de reacción aplicada en la curva para cambiar la dirección y el sentido de las fuerzas.

Se plantea un diagrama de cuerpo libre para visualizar el fenómeno y se desarrolla la formulación.



### 5.3. Desarrollo de la formulación

Partiendo del siguiente diagrama de cuerpo libre se obtiene la expresión que prueba la existencia de del aumento de la cantidad de movimiento debido a la fuerza por exceso en curvatura. Se parte de la expresión de flujo de cantidad de movimiento.

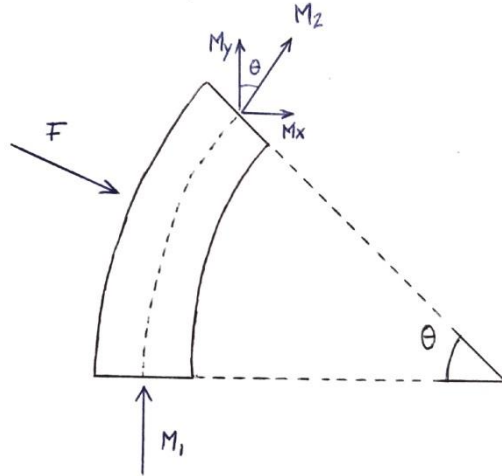


Ilustración 109: Equilibrio de fuerzas

$$\Sigma F = \rho Q [\Delta u]$$

Descomposición de fuerzas en x e y:

$$F_x = M_{1x} - M_{2x} = -M_2 \sin \theta$$

$$F_y = M_{1y} - M_{2y} = M_1 - M_2 \cos \theta$$

Calculo de la fuerza total neta en la curvatura:

$$F_T = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2}$$

$$F_T = \sqrt{(-M_2 \sin \theta)^2 + (M_1 - M_2 \cos \theta)^2}$$

$$F_T = \sqrt{M_2^2 (\sin \theta)^2 + M_1^2 - 2M_1 M_2 \cos \theta + M_2^2 (\cos \theta)^2}$$

$$F_T = \sqrt{M_2^2 + M_1^2 - 2M_1 M_2 \cos \theta}$$

Obtenida la expresión suponemos,

$$M_1 = M_2$$

Entonces,

$$F_T = \sqrt{2}M\sqrt{1 - \cos \theta}$$

#### 5.4. Verificación de la hipótesis

Se realiza una evaluación de la fórmula de la fuerza total neta obtenida entre 0 y  $\pi$ . En la siguiente tabla se muestra la variación de la fuerza en el intervalo propuesto, que comprende la longitud total de giro de una oreja.

$\theta$ (°)	$\theta$ (rad)	Ft
0	0	0,00
11	0,2	0,20
23	0,4	0,40
34	0,6	0,59
46	0,8	0,78
57	1	0,96
69	1,2	1,13
80	1,4	1,29
92	1,6	1,43
103	1,8	1,57
115	2	1,68
126	2,2	1,78
138	2,4	1,86
149	2,6	1,93
160	2,8	1,97
172	3	1,99
180	3,14	2,00

Como se observa en la tabla anterior sí que se produce un aumento de la fuerza neta en el recorrido y es remarcable a partir de los 30°. Siendo el máximo a la salida de la curvatura a los 180°. Así, pues, se demuestra un aumento de la tensión de fondo a lo largo de la curvatura.

## 6. Resultados

En el siguiente apartado se muestran las imágenes obtenidas mediante la creación de distintas modelizaciones en el programa IBER. Se han podido analizar las evoluciones de las tensiones de fondo, velocidades y cotas para diferentes morfologías.

Las distintas modelización corresponden a idealizaciones de casos estudiados mediante las imágenes satelitales. Pues al ser una primera aproximación de los cálculos se han realiza una serie de simplificaciones. Se ha generalizado el valor del calado de los brazos del río, suponiendo un valor igual, para todos los tramos y modelizaciones. Los valores utilizados se representan en la tabla siguiente:

Datos modelización	
Q	40.000 m <sup>3</sup>
y	16 m
n	0,032

El formato de presentación de las imágenes sigue siempre el mismo orden: tensión de fondo, velocidades y cotas.

### 6.1. Modelización base

La modelización base es el caso ideal en el cual los brazos del río tienen unas dimensiones continuas sin variación es su geometría. Así pues, esta, supone el caso base para corroborar la localización de las tensiones de fondo en los lugares supuestos.

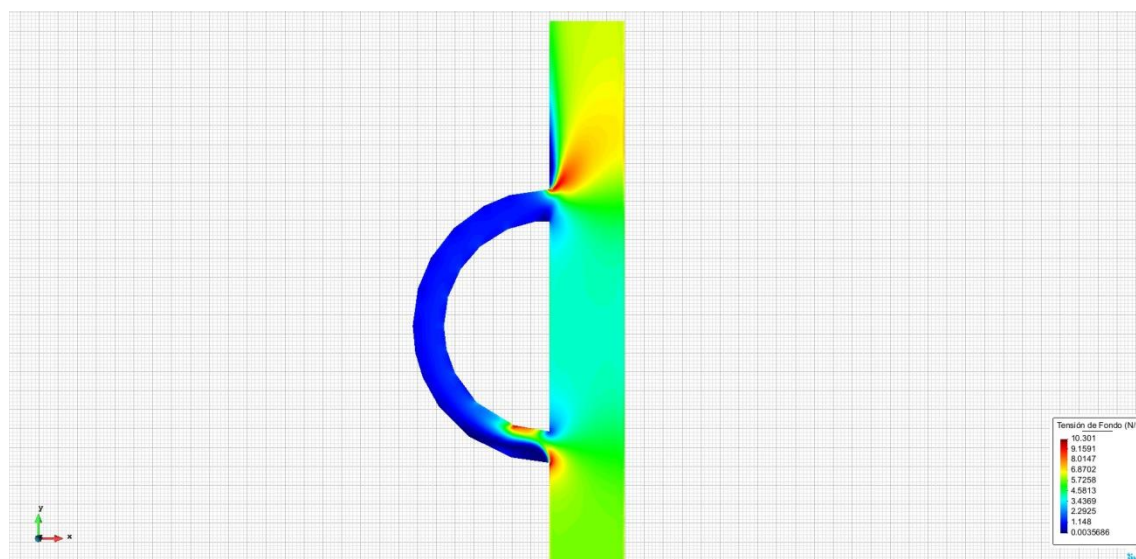


Ilustración 110: Tensión de fondo MB

En la ilustración 110, el agua circula desde abajo hacia arriba, se observa el flujo del agua por las tensiones de fondo producidas. Principalmente por la estela dibujada a la salida del brazo de oreja por las tensiones de fondo.

Se observa que en el tramo inicial del brazo principal hay una distribución constante hasta llegar al brazo de la oreja. Justo en el punto de la entrada, en la bifurcación, se observa un aumento considerable de las tensiones de fondo y también en la zona de colisión con la isla que forma el brazo. En este mismo brazo, el de oreja, se observa un descenso gradual de las tensiones de fondo hasta su mitad que, después, vuelven a aumentar a partir del cambio de dirección hacia la salida. Es en el punto de salida donde se observa la zona con mayor tensión de fondo que afecta a una amplia zona hasta varios kilómetros aguas abajo.

En el brazo principal, con un trazado rectilíneo, se observa una disminución de las tensiones de fondo con una distribución simétrica entre la entrada y salida del brazo de oreja. Aquí, se observa como el flujo saliente del brazo de la oreja frena el caudal del brazo principal. Siendo, así, causa de sedimentaciones en el brazo principal justo por encima de la salida del brazo de la oreja.

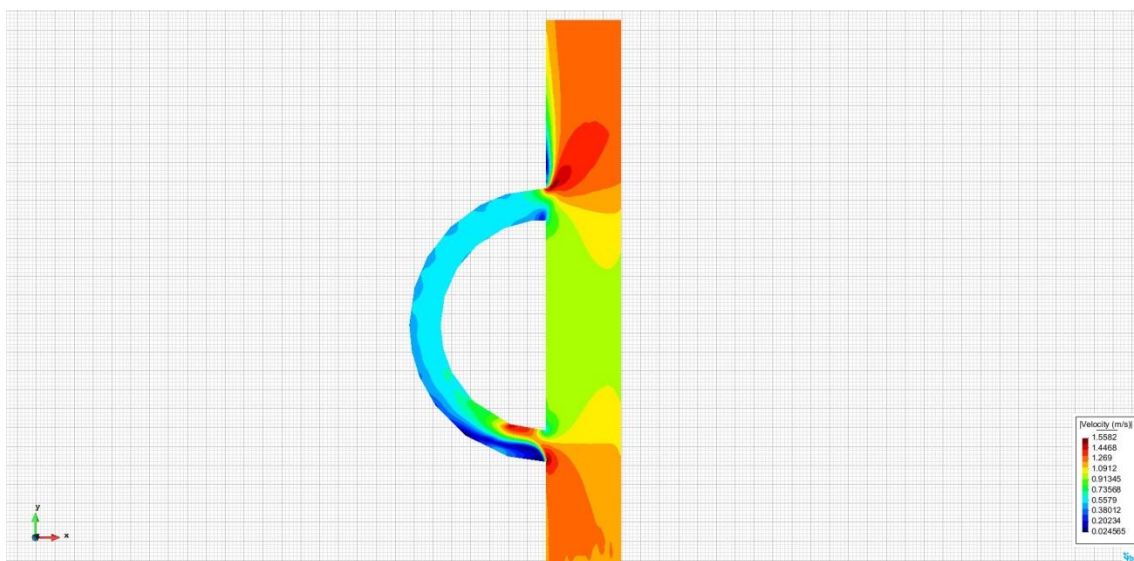
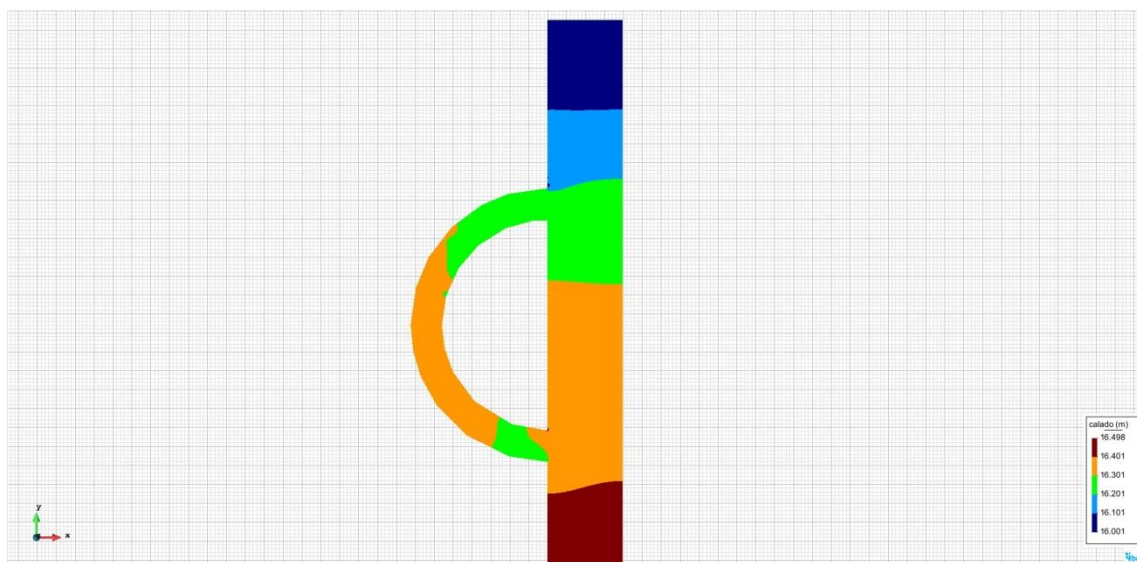


Ilustración 111: Resultado de velocidades MB

Analizando la imagen, véase ilustración 111 correspondiente a el resultado de las velocidades, se observa como al inicio de la morfología las velocidades van aumentando hacia el margen izquierdo donde se encuentra localizada la entrada del brazo de oreja. En el punto de la entrada la velocidad es muy alta hasta colisionar con la isla de la oreja. Entonces en el brazo de oreja, las velocidades van disminuyendo hasta su punto central donde aumentan gradualmente hacia la salida. Es en el punto de salida del brazo de oreja donde se observa el mayor aumento de velocidad de toda la morfología.

En el brazo principal se observa una disminución de la velocidad debido a la bifurcación del caudal hacia el brazo, siendo el punto de velocidad más lenta, justo por encima de la salida del brazo de oreja. Este detalle da a entender que la mayor energía del cauce secundario es capaz de frenar al cauce principal por colisión.

Por último se adjunta una imagen correspondiente a las cotas de fondo de la morfología, véase ilustración 112. Se observa en la imagen que las cotas disminuyen tanto a la entrada del brazo de oreja como a la salida. En la entrada es debido a las tensiones de fondo que erosiona el lecho del brazo y a la salida es debido al aumento de la tensión de fondo debido al exceso de fuerza en curvatura.



**Ilustración 112: Resultado cotas IBER MB**

## 6.2. Modelización Punto Singular 1

El punto singular 1 representa un caso muy parecido a la modelización base. Esto se debe al constar de un solo brazo de oreja en el año 1984. Por los cambios observados en esta morfología se realizan la modelizaciones correspondientes a 1984 y 2017.

La elección de este punto singular para su modelización se debe a la similitud con la modelización base. La característica peculiar es que el brazo de oreja se estrecha desde el punto de entrada a la salida de manera gradual. Además se ha introducido un ángulo menor de salida, más representativo de la realidad. Este hecho es tendencia en este tipo de formaciones y se ha observado mediante las imágenes satelitales.

### Modelo PS1\_1984

En el modelo expuesto se observa la misma tendencia en relación con la tensión de fondo, velocidades y cotas. Aun así, debido a la corrección de la geometría, en la cual se ha añadido el estrechamiento gradual y el ángulo de salida, se observa que el efecto producido es el mismo aunque al tener un menor ángulo de incidencia a la salida las tensiones producidas son menores.

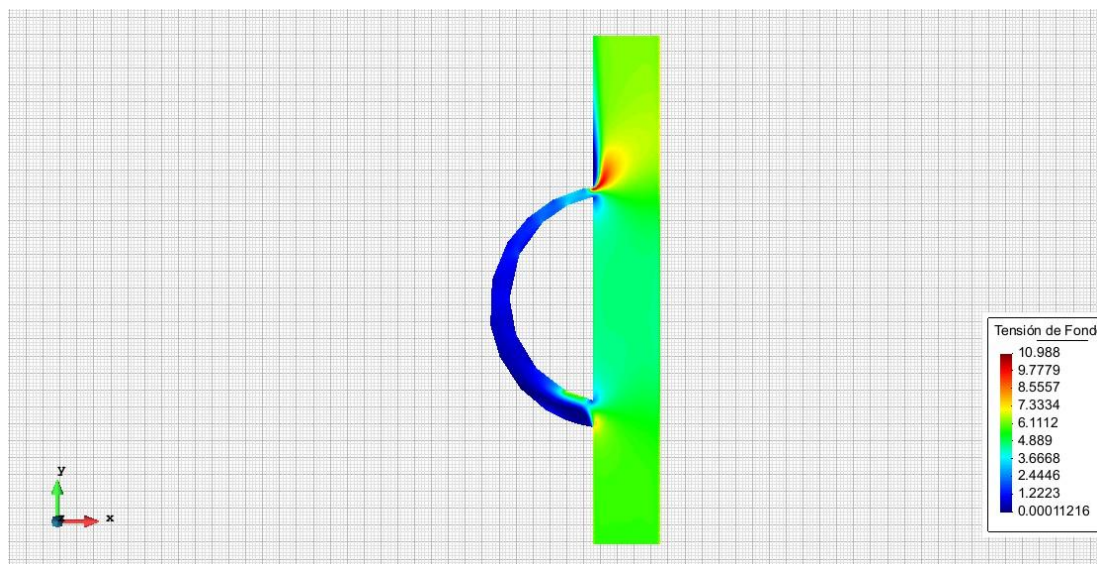


Ilustración 113: Tensión de fondo PS1\_1984 IBER



Tanto el régimen de velocidades como de cotas sigue el mismo patrón que el de la modelización base. En la imagen resultado de las velocidades sí que se observa de una manera más acertada el aumento de la velocidad a medida que llega a la salida del brazo de oreja.

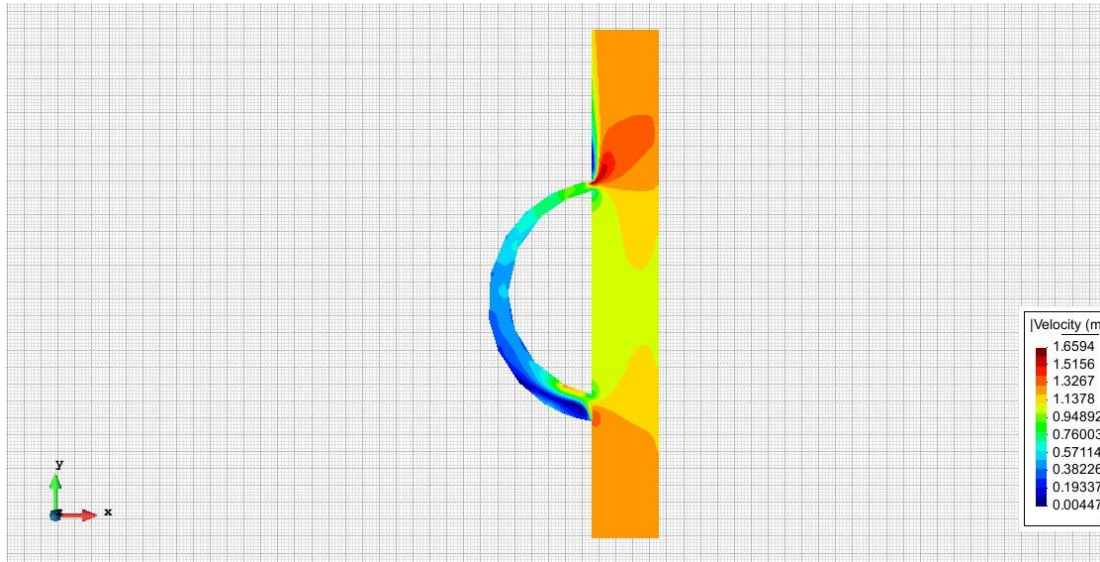


Ilustración 114: Resultado velocidades PS1\_1984 IBER

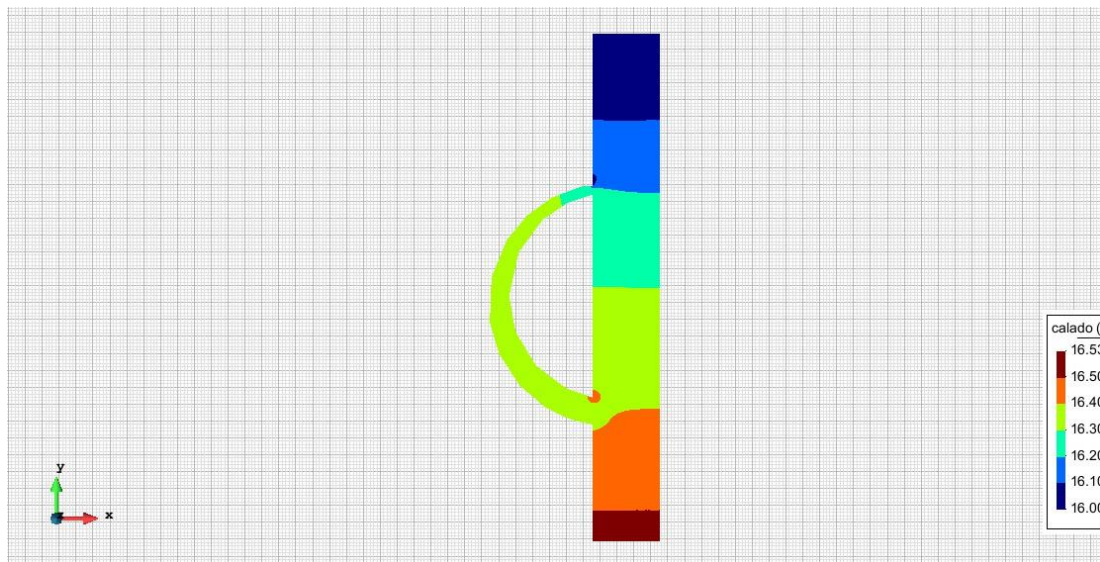


Ilustración 115: Resultados cotas PS1\_1984 IBER



## Modelo PS1\_2017

En año 2017 se encuentra una isla permanente en el cauce principal. Esta isla forma un brazo que aún no presenta las características que representan a una oreja. Aun así, el cambio en la configuración de la morfología afecta tanto a las velocidades como a las tensiones de fondo. Las siguientes imágenes son prueba de ello.

El análisis de las tensiones, ilustración 116, muestra una disminución de la tensión en los tres brazos que forman la zona central de la morfología. El gradiente es representativo pero se debe tener en cuenta que al ser una aproximación inicial los calados en todos los brazos son de 16 m. Aun así, se observa el mismo fenómeno descrito de mayores tensiones tanto a la entrada del brazo de oreja como a la salida.

En el caso del brazo central se observa un aumento de las tensiones en el punto central de la nueva isla permanente y zonas de baja tensión tanto al inicio como al final. Estas zonas de baja tensión corresponden a las zonas sedimentarias que aumentan el tamaño de la isla después de las deposiciones.

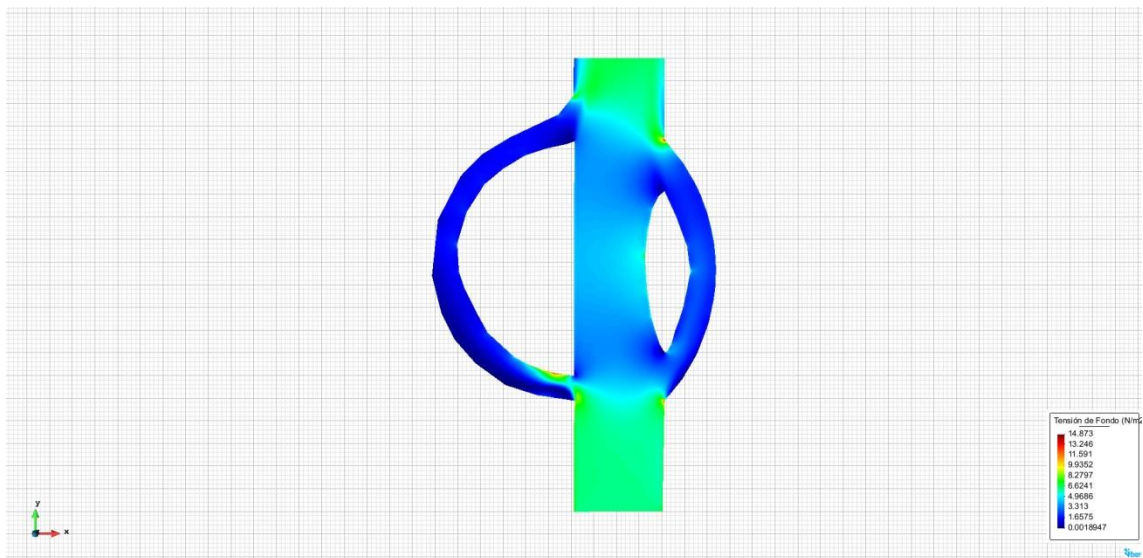
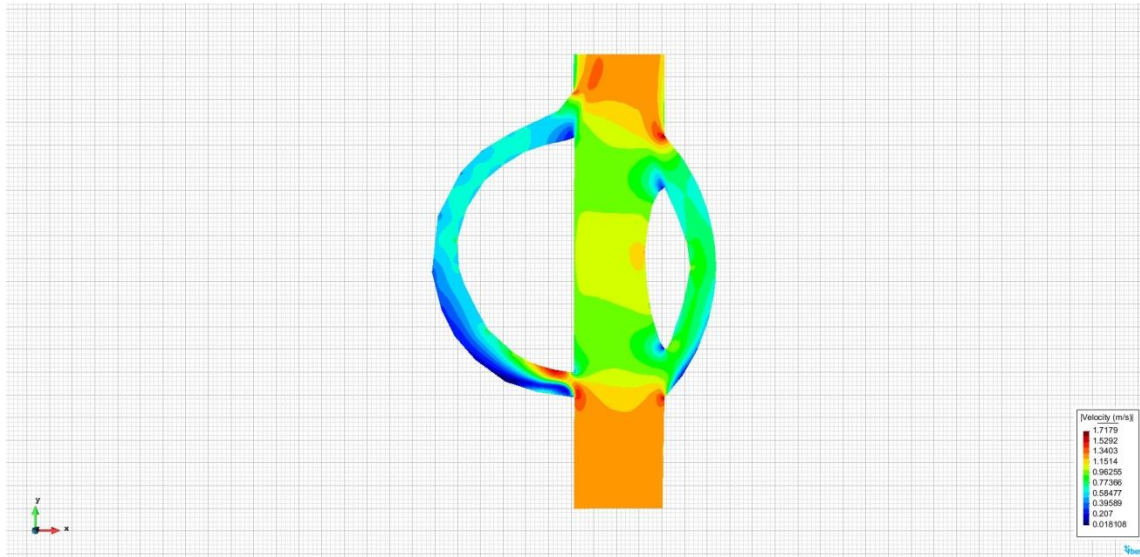


Ilustración 116: Tensión de fondo PS1\_2017 IBER



**Ilustración 117: Resultado velocidades PS1\_2017 IBER**

Respecto a la imagen resultado de las velocidades, ilustración 117, corresponde más con la idea del modelo base. Esto se debe a que el gradiente de velocidad es más visual que el de tensiones para el caso analizado. Se observan grandes tensiones de fondo tanto a la entrada de los brazos laterales como a la salida de estos. En el brazo de oreja se observa la variación de la velocidad respecto al margen izquierdo debido a la tensión de fondo.

En la zona central del cauce central se observa un aumento de la velocidad debido al estrechamiento producido por la nueva isla permanente.

### 6.3. Modelización Punto Singular 5

El caso del punto singular 5 corresponde con la morfología que contiene la ciudad de Leticia. Este caso es de especial mención ya que se ha podido realizar un análisis más acertado por disponer de una batimetría de la zona correspondiente al año 2012. Además ha servido de control de error ya que se han podido calcular los caudales circulantes por cada brazo.

En la imagen de la tensión, ilustración 119, se puede apreciar cual es el cauce principal debido a que es el que mayor tensión de fondo presenta. Así observamos en tonalidades verdosas el flujo principal de agua y en tonalidades de azul más oscuro las zonas que presentan sedimentación.

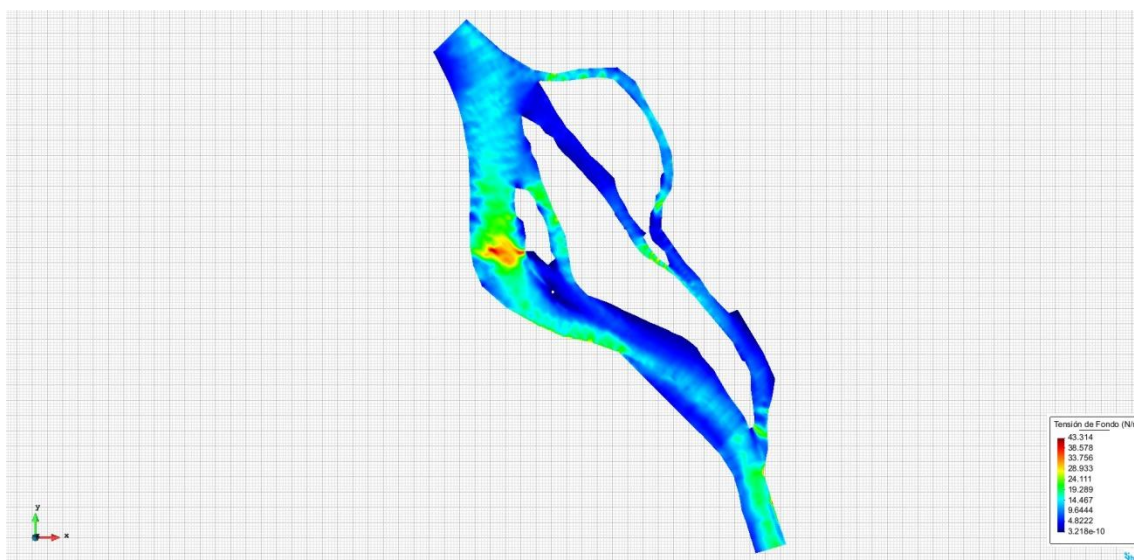
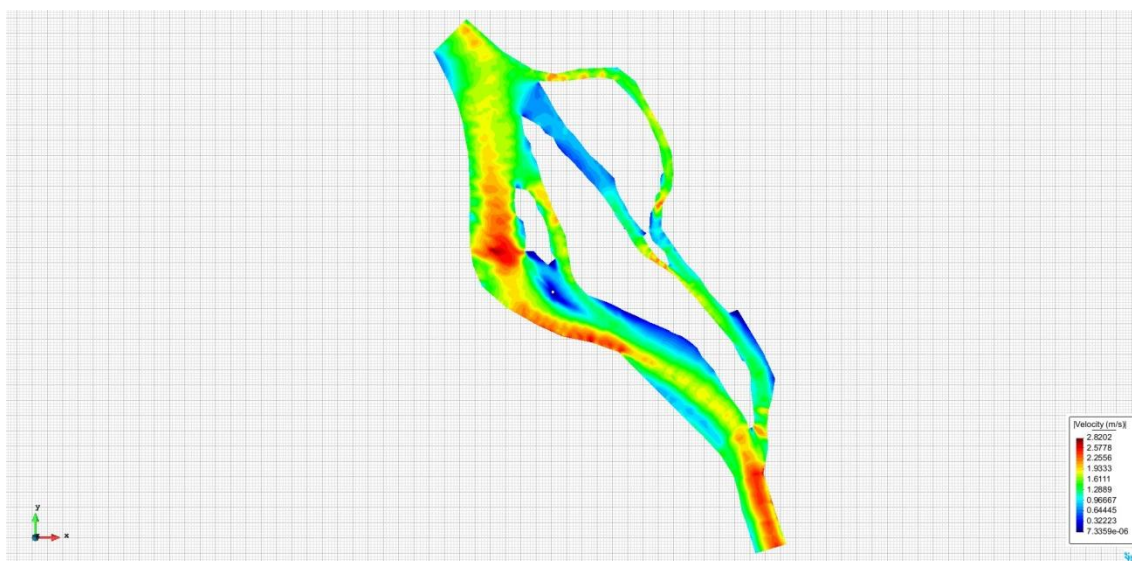
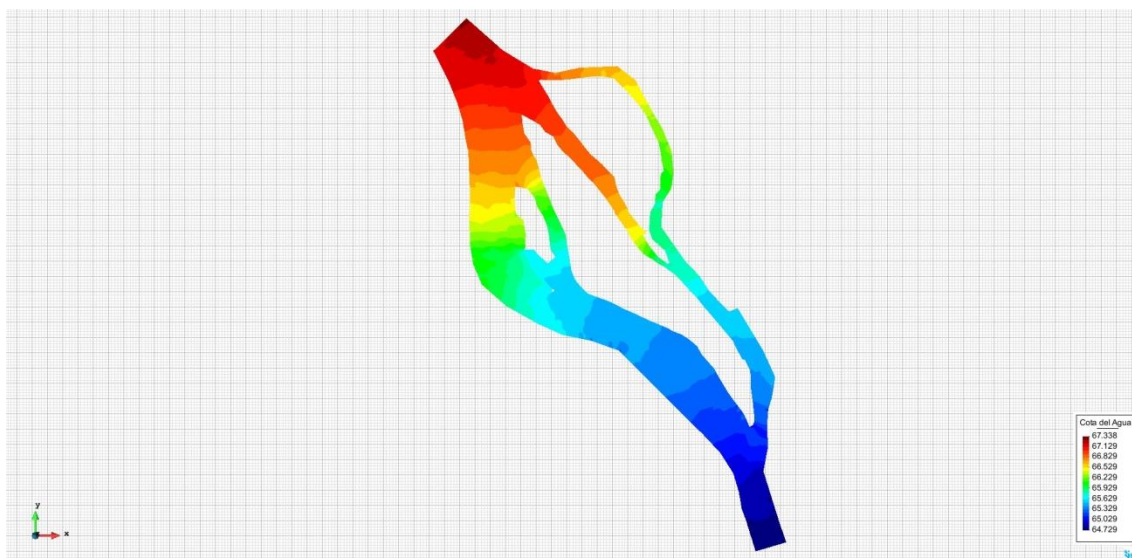


Ilustración 118: Tensión de fondo PS5



**Ilustración 119: Resultado velocidades PS5**

La imagen de las velocidades, ilustración 118, muestra claramente las zonas del flujo que presentan mayor movimiento apreciando nítidamente el cauce principal. Esto también se aprecia en la imagen de calado donde se observa el flujo. En esta imagen se observa como el brazo de oreja presenta unas elevadas tensiones de fondo que siguen la hipótesis propuesta. Además se observa que el brazo central está en tonalidades azules debido a la acumulación de las partículas, causa de la energía de la oreja. En la zona de las deposiciones, unión entre el canal central y la oreja, se aprecia un aumento de la velocidad del brazo central causa del estrechamiento provocado por los sedimentos. En general en tonos azulados se observan las zonas con potencial para sedimentaciones futuras.



**Ilustración 120: Resultado cotas PS5 IBER**



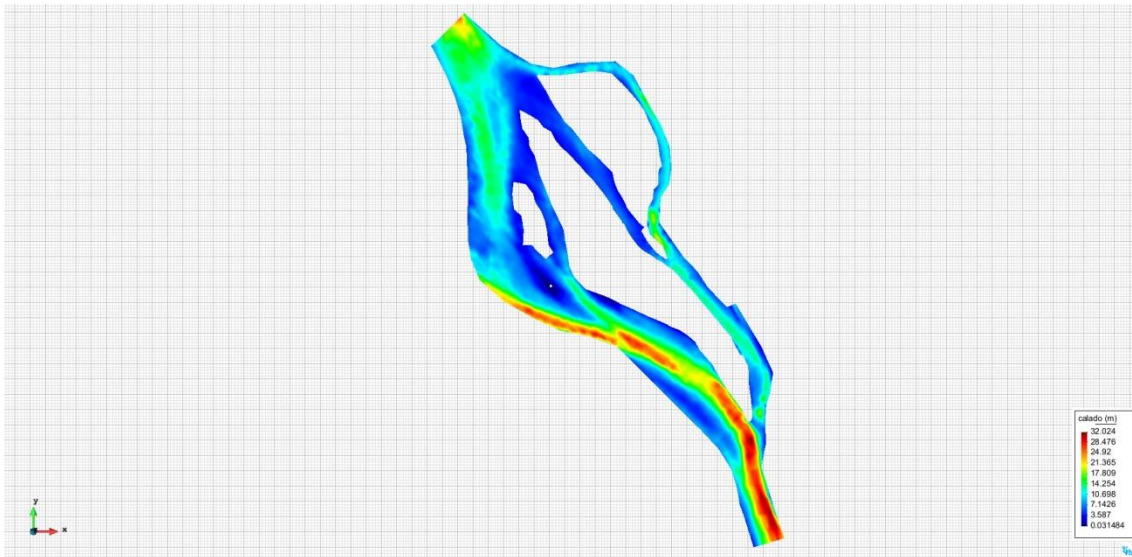


Ilustración 121: Calados PS5 IBER

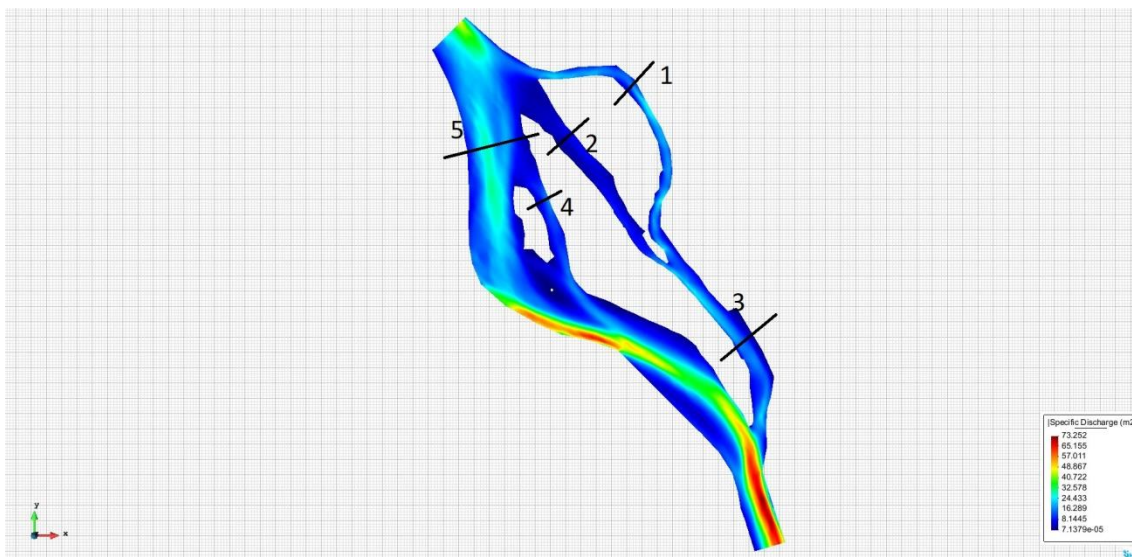


Ilustración 122: Caudales PS5 IBER

En la imagen anterior, de caudales, se observan los cortes realizados en la modelización para el cálculo del caudal. En la tabla se presentan los datos del valor real del caudal y su cálculo en porcentaje. Se observa que en algunos cortes hay errores muy grandes aunque los valores porcentuales son relativamente cercanos. Estos errores pueden ser inducidos al corte del archivo ráster, para el modelado de la imagen, no siendo preciso este.

Número	Caudal (m3/s)	Caudal Real (%)	Caudal Calculado (%)	Error	Error (%)
1	5076,78	12,1	12,5	-0,03305785	-3
2	2588	10,1	6,4	0,36633663	37
3	7652	22,5	18	0,2	20
4	4467	9,1	11	-0,20879121	-21
5	33523	77,7	83	-0,06821107	-7

#### 6.4. Modelización Punto Singular 7

La morfología, o punto singular, 7 se ha analizado por su curiosa evolución. Inicialmente, como se puede observar en el análisis descriptivo, esta morfología presentaba tres brazos y uno de ellos formaba una oreja. El curioso desarrollo de esta formación es debido al desplazamiento de la oreja inicial hacia aguas abajo debido a la erosión y la formación de una nueva en su misma posición.

Esta modelización presenta una dificultad visual en el caso de las tensiones por presentar prácticamente la misma tonalidad en la zona central de los tres brazos de la formación.

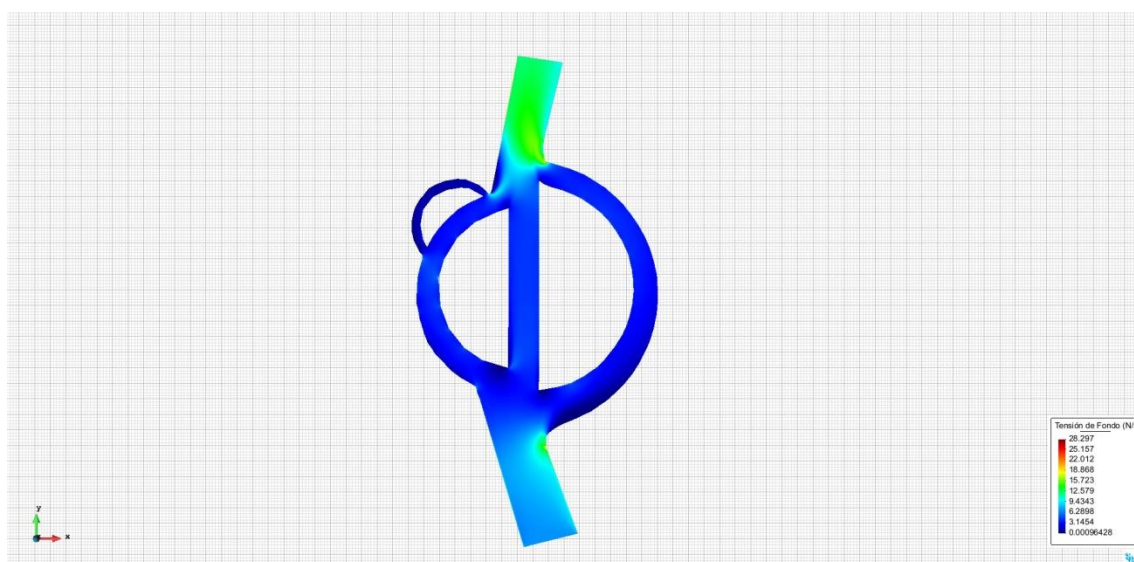


Ilustración 123: Tensión de fondo PS7 IBER

El caso de las velocidades es más ilustrativo y se observa el fenómeno descrito en la hipótesis de esta tesina. Además se observan claramente las zonas de sedimentación donde las velocidades son muy bajas.

Los brazos presentan un gradiente de velocidades diferente dependiendo de la forma de cada uno. Existen velocidades grandes a la entrada del brazo lateral derecho y se observa una zona de velocidades bajas en el margen exterior. Cuando traza la curva, las velocidades van aumentando hasta unir su flujo de agua con el tramo principal. Es en este punto donde se observan las velocidades más altas aumentadas por la adición de caudal con mayor energía.

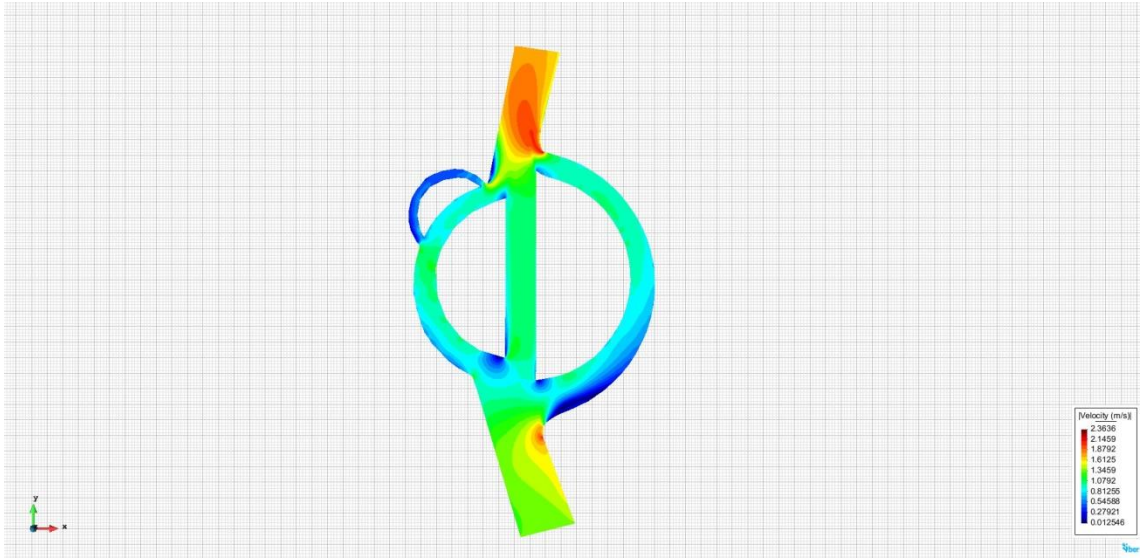


Ilustración 124: Resultado de velocidades PS7



## 7. Conclusiones

Durante el desarrollo de este trabajo mediante el análisis descriptivo de las imágenes satelitales y el análisis físico del flujo en curva se concluye que la hipótesis planteada responde ajustadamente al fenómeno observado.

Por lo tanto, se concluye que las sedimentaciones producidas al final de la oreja son producto del exceso de fuerza generada en el trazado curvo.

La confirmación de la hipótesis implica la existencia de una fuerza por exceso de curvatura. Así que la formulación resuelta responde a la relación existente entre el flujo de cantidad de movimiento entre dos secciones en curva. Se obtiene una expresión sencilla que relaciona la fuerza neta por exceso de curvatura respecto a la fuerza específica y el ángulo de salida.

Este trabajo se desarrolla en dos fases principales; la descriptiva, dónde pueden observarse, gracias a las imágenes satelitales tratadas, las morfologías concretas que forman la zona de estudio del trabajo, y por otro lado, el análisis físico que demuestra el flujo de cantidad de movimiento y por qué son producidas las sedimentaciones.

Después de comprobar una correlación y varias similitudes entre las zonas de estudio, la formulación matemática respalda la relación existente entre el flujo de la cantidad de movimiento de las dos secciones. De tal manera que es posible la simplificación de dicha relación. Este estudio basa sus cálculos en la fuerza total neta.

## 8. Estudios Futuros

El estudio realizado significa un inicio en esta área del transporte de sedimentos. Así que abre las puertas a la realización de nuevos estudios con esta aproximación inicial.

El estudio de los ríos y su evolución comprende una gran cantidad de variables a tener en cuenta y, por tanto, implica que en siguientes estudios se deberían ir incluyendo todas estas variables algunas aun por desarrollar.

El estudio de los vórtices y corrientes secundarias podría ser un buen ejemplo de seguimiento de esta tesina. Con esto se podría desarrollar un análisis tridimensional del funcionamiento de la energía en los ríos, especialmente en las curvaturas.